

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
OTMANE BEKKAOUI

RESEAUX DE CAPTEURS D'HYDROGÈNE PASSIFS SANS FIL

FÉVRIER 2013

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

L'objectif du projet est l'implémentation d'un capteur d'hydrogène dans un réseau de capteurs passifs sans fil opérant dans la bande ISM (industriel, scientifique et médical) 902 – 928 MHz. Le capteur d'hydrogène proposé est de type MOS (métal oxyde-silicium). Le système proposé inclut une antenne pour transmettre les mesures effectuées au lecteur. Le réseau sans fil est réalisé en exploitant les dimensions des capteurs. Chaque capteur présente une capacité différente des autres capacités MOS en fonction de l'aire de la couche sensible exposée au gaz, ce qui fait en sorte que chaque étiquette résonnera à une fréquence différente. Les différentes étapes de fabrication et d'optimisation de l'étiquette sans fil sont décrites dans les différentes sections de ce mémoire.

Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire de microsystemes et télécommunications (LMST), au sein du Département du génie électrique et génie informatique dans l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Frédéric Domingue, pour m'avoir accueilli dans le laboratoire. Merci pour vos conseils précieux, votre soutien, votre disponibilité et surtout toute la confiance que vous avez su m'accorder.

Je tiens à remercier également mon codirecteur, Monsieur Adel Omar Dahmane, notamment pour son soutien et son appui permanent, pour ses conseils directifs afin que je puisse réussir mon cheminement pour l'obtention du diplôme de maitrise.

Je tiens à remercier mes collègues de recherche, pour leurs aides, pour l'esprit d'équipe qui règne à l' LMST.

Je tiens à remercier la fondation de l'université du Québec à Trois-Rivières pour son soutien financier, Merci une autre fois.

Enfin, je tiens à remercier tous les membres de ma famille pour leur soutien et leurs appuis moraux. Je leur serai reconnaissant toute ma vie.

Table des matières

Résumé.....	ii
Avant-propos.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	x
Liste des symboles	14
Chapitre 1 - Introduction.....	17
Chapitre 2 - Revue de la littérature	20
2.1 Les capteurs sans fil	20
2.1.1 Les étiquettes actives	22
2.1.2 Les étiquettes passives	22
2.1.3 Les techniques de couplage	23
2.1.3.1 Couplage radiatif.....	23
2.1.3.2 Couplage inductif.....	25
2.2 Réseau de capteurs passifs sans fil	27
2.2.1 Principe de fonctionnement du Étiquette RF	28

2.2.2	Région du champ	29
2.3	Antenne de l'étiquette	30
2.3.1	Les principaux types d'antennes de étiquette RFID UHF	30
2.3.1.1	L'antenne imprimée	30
2.3.1.2	L'antenne IFA	31
2.3.1.3	L'antenne à fentes	32
2.3.1.4	L'antenne dipôle micro ruban	33
2.3.1.5	Impédance de l'antenne	37
2.4	Les capteurs d'hydrogène	38
2.4.1	Le capteur acoustique	38
2.4.2	Le capteur catalytique	39
2.4.3	Capteur basé sur la conductivité thermique	41
2.4.4	Le capteur optique	42
2.4.5	Le capteur électrochimique	43
2.4.6	Les capteurs MOS	45
2.4.6.1	Diode à jonction p-n	45
2.4.6.2	Les capteurs à base de diode Schottky	46
2.4.6.3	Les capteurs à base de transistor à effet de champ	47
2.4.6.4	Les capteurs capacitifs MOS	48

2.5	Principes de la capacité MOS.....	49
2.5.1	Mécanisme de détection d'hydrogène	54
2.5.2	Théorie des bandes dans capteurs	55
2.5.3	Tension de la bande plate.....	57
2.6	Performances des capteurs d'hydrogène	59
2.6.1	Temps de réponse et de récupération.....	59
2.6.2	Plage de Température	60
2.6.3	Plage d'humidité ambiante	62
2.6.1	Étalonnage	64
2.7	Conclusion.....	65
Chapitre 3 - Conception d'une étiquette RF sans fil.....		68
3.1	Introduction	68
3.2	Simulation de la réponse du capteur MOS capacitif.....	70
3.2.1	Effet de l'épaisseur du substrat et de la couche d'oxyde.....	71
3.2.2	Calcul de l'aire de la couche sensible	73
3.2.3	Simulation de la capacité MOS	74
3.3	Conception de l'antenne dipôle micro ruban	74
3.3.1	Conception de l'antenne UHF	75
3.3.2	Identification des propriétés de l'antenne en fonction de l'application visée	77

3.3.3	Effet du substrat sur les performances de l'étiquette	78
3.3.1	Propriété du substrat de l'antenne.....	79
3.3.2	Géométrie de l'antenne dipôle microruban	80
3.4	Conception de l'étiquette RF.....	82
3.5	Conclusion.....	87
Chapitre 4 - Résultats expérimentaux		88
4.1	Fabrication du capteur MOS	88
4.1.1	Suppression de la couche d'oxyde.....	89
4.1.2	Déposition du palladium.....	91
4.1.3	Création des motifs du Palladium.....	94
4.1.4	Dessin de masque du capteur de gaz MOS.....	96
4.1.5	Déposition de l'aluminium	97
4.1.1	Gravure du palladium	98
4.2	Fabrication de l'étiquette RF	100
4.2.1	Implémentation physique de l'antenne	100
4.2.2	Mesure de l'étiquette	102
Conclusion		104
Bibliographie (ou Références)		106
Annexe A – Équations de la capacité MOS.....		113

Annexe –B. Schéma Électrique du circuit RF	117
Annexe –C. WIRELESS PASSIVE HYDROGEN GAS SENSOR	118

Liste des tableaux

Tableau 3	Signe de variation de la résistance (augmentation ou diminution) dans la présence du gaz	55
Tableau 2	Résumé des données de performance pour chaque type de capteur disponible [42]	64
Tableau 1	Les principales performances et spécificités des différentes fréquences utilisées en RFID [44]	69
Tableau 4	Paramètres de simulation du capteur MOS sur nanohub	71
Tableau 5	Sommaire des performances de l'antenne dipôle micro ruban à 906.9 MHz.....	82
Tableau 6	Les différentes fréquences de résonance des différents étiquettes sans fil.....	86
Tableau 7	Caractéristiques du substrat utilisé dans la fabrication du capteur MOS	88
Tableau 8	Fiche technique du système de déposition E-Beam – Axxis.....	93
Tableau 9	Fiche technique du système de déposition par pulvérisation cathodique CMS-18.....	99
Tableau 10	Fréquences de résonance des différents étiquettes sans fil conformément à la valeur de la capacité MOS.....	103

Liste des figures

Figure 1	Capteur autonome passif.	17
Figure 2	Principes de fonctionnement des différents systèmes RFID [3].	21
Figure 3	Schéma général d'un système d'identification par radiofréquence [4].	21
Figure 4	Alimentation d'un transpondeur à couplage inductif par l'énergie magnétique fournie par le lecteur [6].....	23
Figure 5	Couplage radiatif (900MHz), avec la puissance associée et la temporisation (time delays) [9].	24
Figure 6	a) Circuit électrique d'une antenne, b) Circuit résonant à couplage inductif [11].	25
Figure 7	Étiquette RFID Basse Fréquences, proximité 125kHz T5557 / T5577 LF RFID Étiquettes à disques clairs [12].....	26
Figure 8	RFID hautes fréquences [14].....	26
Figure 9	Diagramme bloc du réseau de capteurs sans fil	27
Figure 10	Technique de mesure de la distance de lecture	28
Figure 11	Régions de champ d'une antenne.	30
Figure 12	L'antenne imprimée [16].....	31
Figure 13	Diagramme de structure d'une antenne IFA [17].	32
Figure 14	Structure de l'antenne à fentes [18].	33
Figure 15	géométrie d'une antenne dipôle micro-ruban [19].....	34
Figure 16	Couplage par proximité [16].	36
Figure 17	Couplage via une ouverture d'une antenne patch [20].	36

Figure 18	Le banc d'essai pour les mesures d'impédance avec un balun [21].	37
Figure 19	Structure d'un capteur acoustique [24].	38
Figure 20	Réponse d'une étiquette acoustique (SAW) [3].	39
Figure 21	Montage en pont de Wheatstone reliant les perles actives et inactives dans le Pellistor [24].	40
Figure 22	Cellule de mesure et de référence d'un capteur de conductivité thermique connecté dans un circuit à pont de Wheatstone [24].	41
Figure 23	Capteur optique d'hydrogène dans lequel l'invite de la décoloration rapide du film WO ₃ /Pt se produit au cours de l'injection de la solution dans une cellule : 1 - niveau de la solution est soulevé ; 2-niveau de la solution est abaissé. [25].	42
Figure 24	Représentation schématique (a) d'un capteur d'hydrogène potentiométrique (b) et d'un capteur de limitation de courant ampérométrique [2].	45
Figure 25	diode à jonction p-n [27].	46
Figure 26	Structure d'une diode Schottky [27].	47
Figure 27	Digramme bloc du capteur à transistor à effet de champ [27].	48
Figure 28	Diagramme bloc d'une capacité MOS [27].	49
Figure 29	Courbe CV de basse fréquence pour une capacité MOS de type p.	50
Figure 30	Circuit équivalent d'une capacité MOS [30].	51
Figure 31	Effet de la fréquence sur le profil C-V pour une capacité MOS	51
Figure 32	Coupe du condensateur MOS.	52
Figure 33	Schéma de comparaison de la solubilité de l'hydrogène dans le Pd, le Pt et le Ni en fonction de la température à une pression égale à 1 atm [35].	54
Figure 34	Schéma illustrant le principe d'un capteur d'hydrogène de type MOS basé sur une couche SiO ₂ [28].	57
Figure 35	Effet du gaz d'hydrogène sur la réponse d'une capacité MOS [28].	58

Figure 36	Temps de réponse des capteurs et temps de rétablissement Plage Température [42].	60
Figure 37	Gammes de température de fonctionnement des Plage de pression.	61
Figure 38	Gammes de pression de fonctionnement des capteurs d'hydrogène spécifiées par les fabricants et groupées selon le principe de fonctionnement [42].	62
Figure 39	Plage d'humidité relative du fonctionnement des capteurs spécifiées par les fabricants et regroupés selon le principe de fonctionnement [42].	63
Figure 40	Courbe d'étalonnage pour trois capteurs d'hydrogène différents au-dessus de la plage de concentration 0.1-1 % - (1) capteur semi-conducteur (2) capteur électrochimique (3) capteur catalytique de combustion [24].	65
Figure 41	Mesure de la capacitance vs la tension avec comme variable l'épaisseur de substrat.	72
Figure 42	Mesure de la capacitance vs la tension avec comme variable l'épaisseur de la couche d'oxyde de silicium.	73
Figure 43	Calcule de l'aire de la valeur de la capacité en fonction de l'aire de la couche sensible	73
Figure 44	Caractéristique C-V du capteur MOS proposé de type p	74
Figure 45	Capteur passif non linéaire	75
Figure 46	Digramme de conception d'une antenne	76
Figure 47	Schéma de principe de l'antenne patch de forme arbitraire.	78
Figure 48	variation de la bande passante en fonction de l'épaisseur du substrat[47].	79
Figure 49	Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur du substrat [47].	80
Figure 50	Constante diélectrique des matériaux de la série RO4000 vs la fréquence [48].	80
Figure 51	Géométrie de l'antenne dipôle, dimension de l'antenne dipôle.	81
Figure 52	Affaiblissement de réflexion de l'antenne dipôle micro ruban.	81

Figure 53	Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle @ 920.9MHz, à gauche le digramme du gain et la directivité, au centre le digramme de la zone de couverture effective.....	82
Figure 54	Méthodologie de conception de l'étiquette RF	84
Figure 55	Le digramme circuit de l'étiquette sans fil	85
Figure 56	Affaiblissement de réflexion du prototype de l'étiquette RF	85
Figure 57	Affaiblissement de réflexion de l'étiquette RF	86
Figure 58	Procédé de fabrication du Capteur MOS.....	89
Figure 59	Spin-Coater SpinBall, fabricant SITE Services	90
Figure 60	Banc Humide	91
Figure 61	Evaporateur E-beam AXXIS, Manufacturer: Kurt J. Sputter Lesker	92
Figure 62	Vue globale du dessin de masque.....	94
Figure 63	Dimensions du vernier et de la croix.....	95
Figure 64	Dimension du dessin de masque, du vernier et de la croix.	96
Figure 65	a) Les couches de métal sous la forme d'un carré, b) capacités sous la forme d'un cercle.	97
Figure 66	la Cible en aluminium (gauche), le système de pulvérisation CMS-18 (droite)	98
Figure 67	Aluminium sur la face arrière du substrat.	98
Figure 68	Fabrication de l'antenne micro ruban.	100
Figure 69	Montage de mesure de l'antenne.....	101
Figure 70	Comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations de l'antenne dipôle	101
Figure 71	Dessin des lignes de connexion des éléments passifs du capteur fabriqué.....	102
Figure 72	Les résultats de mesure des fréquences de résonance des différents capteurs sans fil.....	102

Liste des symboles

λ : Longueur d'onde

c : La vitesse de la lumière

C_{ox} : Capacité de la couche d'oxyde de silicium

ρ_s : La densité de charge

N_a : La densité d'accepteur dans le substrat

ρ : La densité de charge totale dans le semi-conducteur

V_{FB} : La tension de la bande plate

ϕ_s : Fonction du travail du semi-conducteur

ϕ_F : Potentiel de référence

ϵ_0 : Constante diélectrique de vide

ϵ_{ox} : Constante diélectrique d'oxyde de silicium

t_{ox} : Épaisseur de la couche d'oxyde de silicium

C_{LF} : Capacité dans les basses fréquences

C_{HF} : Capacité dans les hautes fréquences

V_G : La tension de la grille de la capacité MOS (métal, oxyde silicium)

C_{acc} : La capacité dans la zone d'accumulation

V_t : La tension induite dans l'antenne

L : Longueur de l'antenne

W : Largeur de l'antenne

ϵ_r : Constante diélectrique du substrat

R_r : Impédance de l'antenne

R_t : Impédance de l'antenne du lecteur

ξ_0 : *Air wave Impedance*

G_{ot} : Gain de l'antenne en transmission

G_{or} : Gain de l'antenne en réception

R_{rf} : La distance entre le lecteur et le capteur

P_t : Puissance en transmission

P_r : Puissance en réception

ϵ_{eff} : Constante diélectrique effective

WPSN: Réseaux de capteurs sans fil passifs

H : Épaisseur du substrat de l'antenne

χ : L'affinité électronique

C_d : Capacité de déplétion

Z_0 : L'impédance caractéristique de la ligne de transmission

MISFET : transistor métal-isolant-semi-conducteur à effet de champ

MOSFET : transistor métal-oxyde-semi-conducteur à effet de champ

MOS : métal-oxyde-semi-conducteur

MIS : métal-isolant-semi-conducteur

Chapitre 1 - Introduction

Les capteurs autonomes jouent un rôle très important dans l'environnement. Leur utilisation peut être étendue à plusieurs applications, imposants des milieux hostiles, tels que sous une chaleur extrême, le froid, l'humidité ou des conditions corrosives, voir Figure 1. Un capteur autonome peut être défini comme étant le dispositif qui exécute d'une façon autonome ces fonctions de mesure. Il est relié à l'unité d'acquisition via une liaison sans fil. Ce dispositif est alimenté par une source d'alimentation autonome lui offrant la capacité de prendre des mesures et de transmettre les données [1]. Ces liaisons sans fil sont fortement utilisées dans le domaine industriel où les connexions filaires limitent le mouvement des capteurs. Ces connexions peuvent être facilement endommagées ce qui affecte la fiabilité du système de mesure.

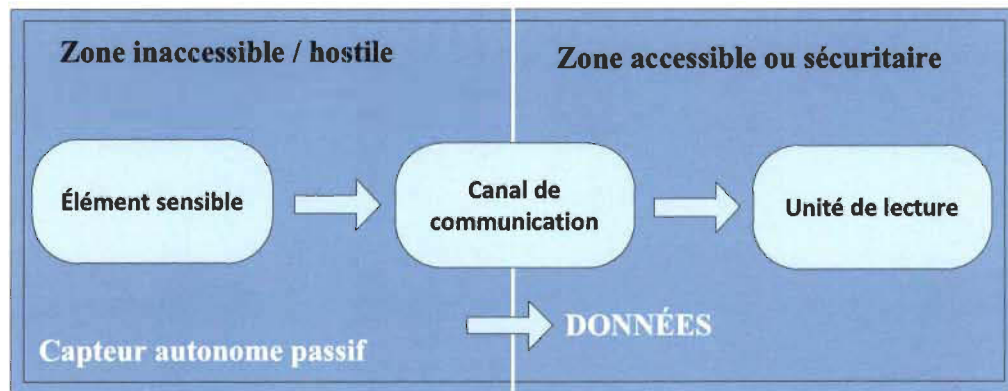


Figure 1 Capteur autonome passif.

Les capteurs d'hydrogène basés sur la structure semi-conducteur-oxyde-métal (MOS : Metal Oxide-semiconductor) ont une très longue histoire. Les premiers rapports de ces dispositifs ont été publiés en 1975. Depuis lors, une énorme quantité de documents a été

publiée sur le sujet. Parmi les rapports, un examen complet sur les performances de ce type de capteur est écrit par Lundstrom et al Stilbert et Svensson en 1975 [1]. Au fil des ans, plusieurs types de ces capteurs utilisant une couche catalytique ont été fabriqués et testés. Ce type de dispositif se subdivise en trois catégories : le transistor à effet de champ métal-oxyde-semiconducteur (MOS-FET), les capacités métal-oxyde-semi-conducteur et les diodes à barrière schottky [2]. Le choix du type de capteur va se faire en fonction de plusieurs paramètres (temps de réponse, plage de température, l'étalonnage...). L'application demande un micro capteur de haute qualité. Pour la détection des fuites de gaz, la sensibilité et le temps de réponse sont prioritaires dans le désigne du capteur. Pour toutes les applications, la fiabilité et la robustesse sont les recommandations de base pour une commercialisation réussite du micro capteurs de gaz.

Puisque notre capteur transmet l'information mesurée d'une manière sans fil, la seconde étape, pour assurer le bon fonctionnement de l'étiquette sans fil est l'étape de conception et la fabrication de la partie RF (Antenne). L'antenne que nous allons étudier est l'antenne dipôle microruban résonnant à 900 MHz. La conception de cette antenne a été faite par le logiciel Momentum.

Après l'assemblage des différentes parties de l'étiquette sans fil, la question qui se pose est de savoir comment créer un réseau sans fil à partir de ces étiquettes qui fonctionnent à l'aide d'une bande ISM 902-928 MHz. La réponse est simple, puisque chaque étiquette contient un capteur caractérisé par une aire d'éléments sensible à l'hydrogène tous différent des autres, alors la fréquence de résonnance de chaque étiquette sera différente des autres étiquettes en fonction de cette aire.

Le mécanisme d'interaction entre le palladium et l'hydrogène est expliqué dans le chapitre 2. Dans la même section on va introduire les différents types de capteurs d'hydrogène et leurs fonctionnements. Comme nous allons étudier le fonctionnement du capteur capacitif (MOS), la fabrication du capteur, ainsi que la fabrication de la partie sans fil, partie dont le rôle la transmission des données collectées par l'élément sélectif dans les chapitres 3 et 4. L'étiquette propage ses ondes suivant la variation de la concentration d'hydrogène. Le fonctionnement de cette étiquette est similaire à l'étiquette RFID passive qu'on trouve dans les magasins de vente de marchandise.

Chapitre 2 - Revue de la littérature

2.1 Les capteurs sans fil

Puisque l'objectif de ce projet est la mise en œuvre d'un réseau de capteurs sans fil passif, une classification de différentes étiquettes existantes est primordiale, pour voir les différentes techniques utilisées et bien choisir le type qui convient avec le domaine d'application. La Figure 2, présente deux catégories d'étiquette : les étiquettes de N bit possédant une unité de stockage numérique et les étiquettes de 1bit. C'est ce dernier type de l'étiquettes que nous voulons exploiter pour la réalisation de notre réseau de capteurs, car le bit est la plus petite unité d'information qui peut être représentée et ne possède que deux états : 1 et 0. Cela signifie que seuls deux états peuvent être représentés par des systèmes basés sur un transpondeur 1-bit : «transpondeur dans la zone d'interrogation» et «pas de transpondeur dans la zone d'interrogation» l'étiquette ne se trouve pas dans la portée du lecteur.

Pour s'alimenter, l'étiquette passive exploite les champs magnétiques générés par le lecteur. La Figure 3 montre le schéma général d'un système RFID. Les deux techniques utilisées dans ce genre de système sont : le couplage inductif et le principe de télé alimentation. Le couplage inductif comprend les systèmes BF et HF, le transpondeur utilise dans ce cas des antennes magnétiques. La seconde technique utilisée dans les étiquettes micro-ondes offre une moins bonne pénétration du signal à travers les obstacles que la bande HF, mais elle permet d'atteindre des distances de lectures plus importantes.

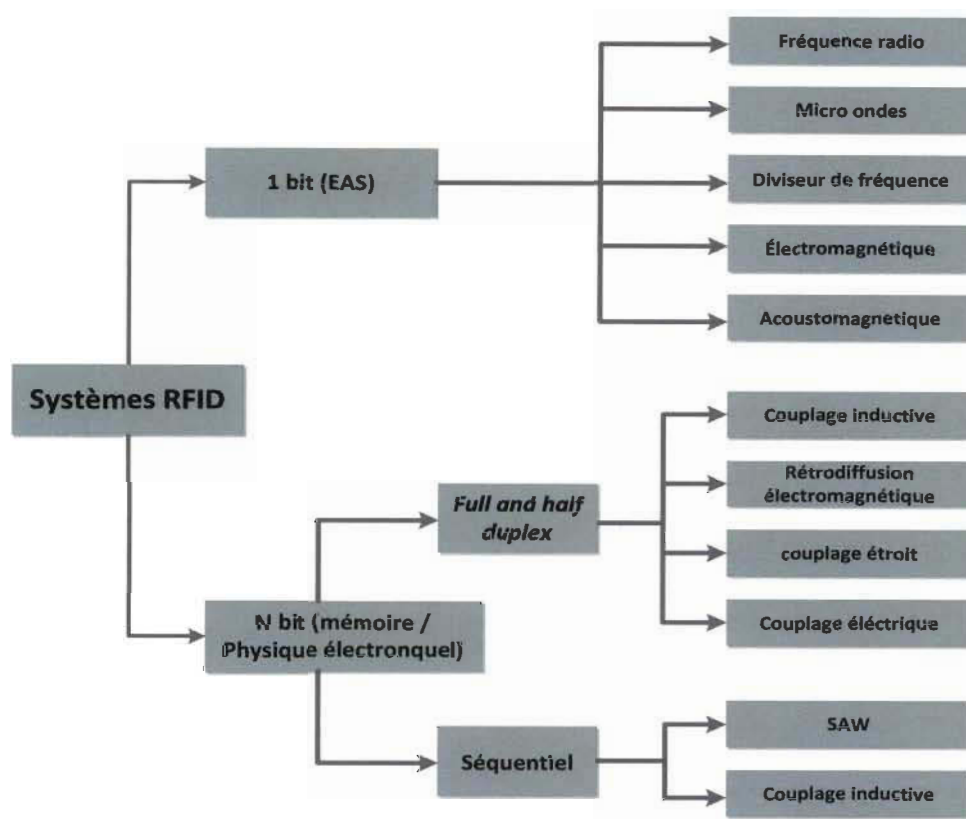


Figure 2 Principes de fonctionnement des différents systèmes RFID [3].

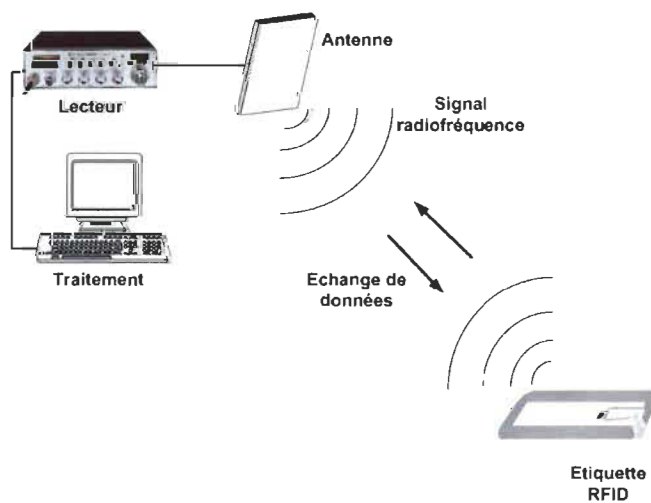


Figure 3 Schéma général d'un système d'identification par radiofréquence [4].

2.1.1 Les étiquettes actives

Généralement, une étiquette active est un système de mesures qui nécessite une source d'énergie embarquée, la plupart du temps assurée par une batterie, et ce, pour la réalisation de la phase de traitement au cours de laquelle le signal est filtré (conditionné), amplifié et converti dans un format compatible et exploitable. Dans ce cas, le capteur doit non seulement mesurer des propriétés physiques, mais doit également effectuer des tâches additionnelles au travers de circuits de traitement et de communication intégrés. Ce type de capteur est surtout utilisé pour assurer des mesures continues en temps réel.

2.1.2 Les étiquettes passives

Les étiquettes passives sont des dispositifs qui ne possèdent pas de source d'énergie, et présentent l'avantage d'être facilement intégrables [3]. Ce type de capteurs est utilisé dans des applications spécifiques (surveillance environnementale, instruments de suivi spatiaux, aéronautique), et dans des applications liées à la santé qui nécessitent des unités de mesure miniatures, passives et de grande précision [3]. L'objectif pour tous les capteurs est d'assurer des mesures à distance des grandeurs physiques. Dans ce cas, les différentes technologies qui peuvent être utilisées pour la transmission sans fil de données sont : la transmission inductive [5], voir Figure 4, et la transmission radio basée les étiquettes micro-onde.

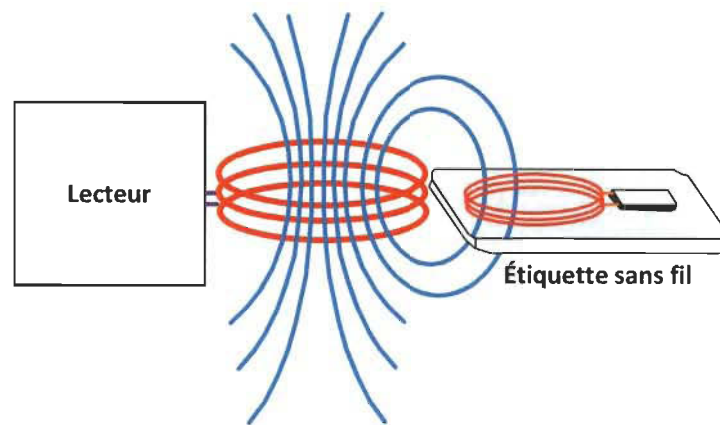


Figure 4 Alimentation d'un transpondeur à couplage inductif par l'énergie magnétique fournie par le lecteur [6].

2.1.3 Les techniques de couplage

Les techniques du transfert sans fil d'énergie ou du signal électrique peuvent être généralement classifiées en deux catégories, le transfert radiatif et le couplage électromagnétique [7].

2.1.3.1 Couplage radiatif

Dans le cas du couplage radiatif, on trouve les étiquettes micro-ondes et les étiquettes UHF, comme le montre la Figure 5. Le signal d'excitation radiofréquence d'une grande puissance et à haute fréquence est essentiel pour réaliser le transfert à longue distance, pour cela c'est ce type de couplage qui sera utilisé dans l'élaboration de notre réseau sans fil [4]. L'étiquette RFID se comporte comme un émetteur récepteur radio, pour qu'elle effectue ces deux fonctions (la mesure et la transmission) et nécessite en règle générale des solutions actives. Dans ce genre d'étiquette, en champ lointain, à une distance de la source (plus de 10 mètres) supérieure de la longueur d'onde, le faisceau diverge pour donner naissance à une onde sphérique localement plane. Le champ électromagnétique

diminue en fonction de $1/d$, inverse de la distance à la source, et l'énergie reçue en fonction de $1/d^2$ [4]. La définition la plus couramment utilisée pour ce genre de champ est

exprimée par l'équation $r = \frac{\lambda}{2\pi}$ (2-1 [8]):

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2-1)$$

Où r est la distance (m) de l'antenne de transmission où le champ lointain surgit et λ la longueur d'onde (m/s) du signal.

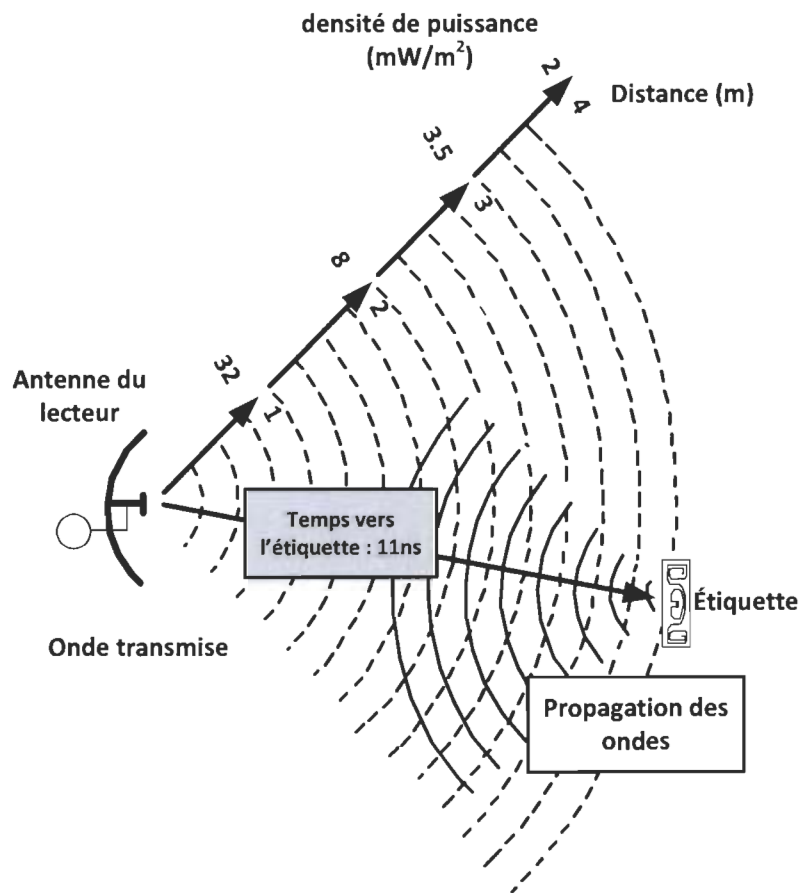


Figure 5 Couplage radiatif (900MHz), avec la puissance associée et la temporisation (time delays) [9].

2.1.3.2 Couplage inductif

Dans le couplage inductif, spécialement le couplage bobine-bobine est adopté dans le système de détection industriel, tels que les capteurs passifs sans fil et les capteurs à courant de Foucault [10]. Dans une chaîne de transmission sans fil, le lecteur présentera une impédance Z_t alimentée par une source électromotrice $\varepsilon(t)$. Le capteur lui aussi possède une impédance Z_s et une impédance de l'antenne Z_d . Les impédances sont placées en série comme le montre la Figure 6 [11].

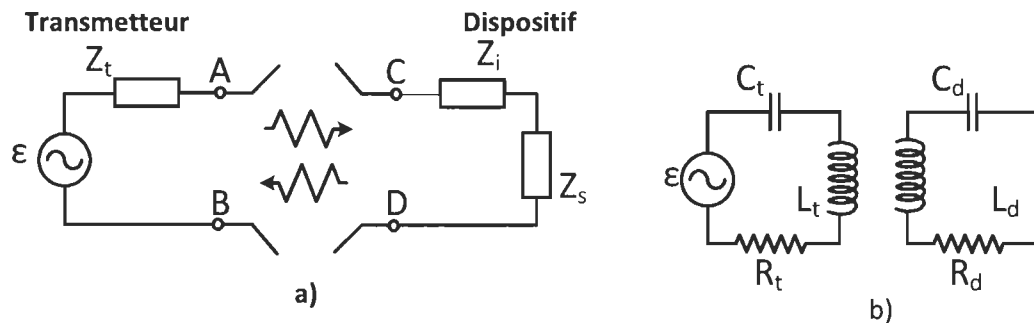


Figure 6 a) Circuit électrique d'une antenne, b) Circuit résonant à couplage inductif [11].

En utilisant la théorie des circuits équivalents, les deux antennes peuvent être remplacées par deux circuits résonnants couplés. L'impédance de circuit d'entraînement, Z_t , peut être écrite comme somme de capacité, d'inductance et de résistance. La résistance due aux rayonnements, c.-à-d. causée par la perte de puissance à un champ électromagnétique, ou à la résistance intrinsèque provoquée par le chauffage simple du circuit physique. Dans ce type de couplage, on distingue deux catégories de l'étiquette :

- Les étiquettes à couplage inductif fonctionnent dans les basses fréquences, caractérisées par une distance de lecture de quelques centimètres, dans la

boucle magnétique du lecteur. La Figure 7 montre des exemples d'étiquette BF.



Figure 7 Étiquette RFID Basse Fréquences, proximité 125kHz T5557 / T5577 LF RFID Étiquettes à disques clairs [12].

- La RFID HF est réalisée par couplage inductif entre deux bobines d'antenne, l'un au lecteur, l'autre dans la balise. Pour les systèmes RFID 13,56 MHz, le transfert de puissance et l'établissement de la communication entre le lecteur RFID et les étiquettes sont menés par couplage inductif. Pour le lecteur d'une puissance de sortie donnée, la distance de fonctionnement de système RFID est principalement déterminée par la taille de bobine et le flux magnétique à travers la bobine [13]. Habituellement, pour agrandir la couverture de lecture, une grande bobine doit être prise en considération, la Figure 8 montre un exemple de ce genre d'étiquettes.



Figure 8 RFID hautes fréquences [14].

2.2 Réseau de capteurs passifs sans fil

Le réseau de capteurs passifs sans fil (WPSN : Wireless Passive Sensor Network) est alimenté par une source d'énergie RF externe, voir la Figure 9. Le WPSN est caractérisé par son faible coût et par des nœuds d'une faible consommation d'énergie [15]. Le réseau de capteurs est alimenté par l'énergie fournie par une source de puissance RF externe. Le signal incident de la source RF est réfléchi par les nœuds WPSN. Les nœuds modulent ces signaux en changeant l'impédance de ces antennes, on parle ici d'une rétrodiffusion modulée. La portée de la communication est déterminée par l'intensité du signal incident. Toutefois, le circuit de transmission est une antenne d'impédance commutée, ce qui rend le WPSN libre de la durée de vie par rapport aux réseaux de capteurs classiques. Pour répondre aux besoins de l'application, les caractéristiques de l'événement doivent être détectées de manière fiable et transmises par l'exploitation collective de nœuds de capteurs. La Source RF reçoit le signal réfléchi à partir de nœuds de capteurs, les capteurs doivent envoyer les données collectées au lecteur sans provoquer aucune interférence dans le réseau.

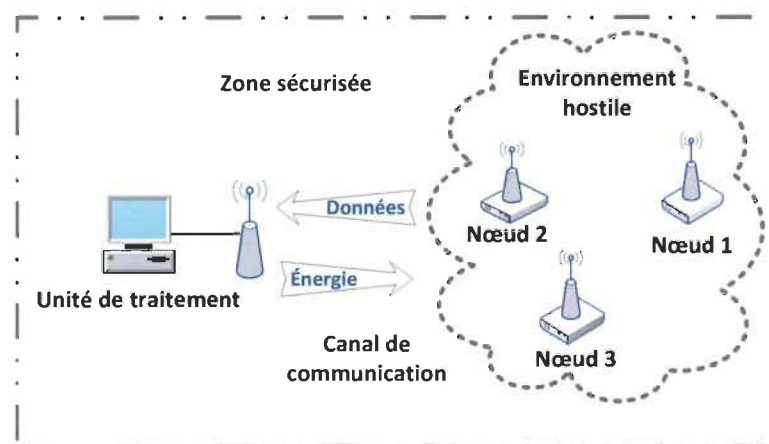


Figure 9 Diagramme bloc du réseau de capteurs sans fil

2.2.1 Principe de fonctionnement du Étiquette RF

Dans la mise en œuvre des réseaux de capteurs passifs sans fil, P_r et P_t représentent respectivement la puissance reçue par le capteur et la puissance transmise par la source RF. Puis, le signal RF se propage selon l'équation de transmission Friis ci-dessous.

$$P_r = P_t G_{Ot} G_{Or} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{rf}} \right)^2 \quad (2-2)$$

Avec G_{Ot} et G_{Or} les gains des antennes, R_{rf} la distance entre le lecteur et le capteur, λ la longueur d'onde, voir la Figure 10.

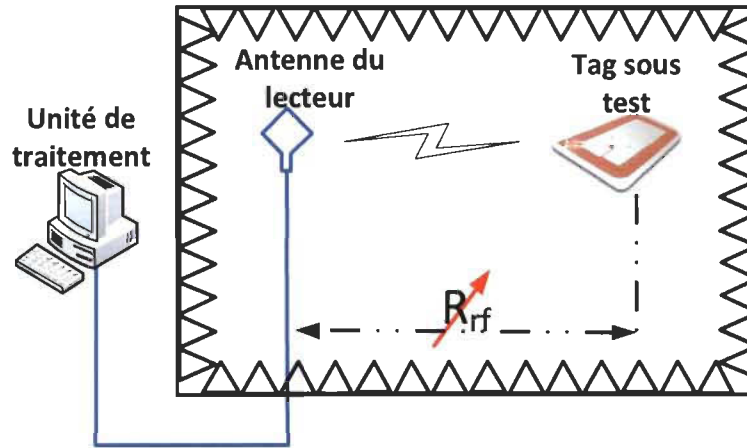


Figure 10 Technique de mesure de la distance de lecture

La tension induite dans l'antenne du capteur du réseau due au signal incident de la source RF est V_t , alors la relation entre la puissance reçue RF et le niveau de la tension induite V_t est exprimée par la relation suivante :

$$P_r = \frac{|V_t|^2}{8(R_r + R_t)} \quad (2-3)$$

Avec R_r présente l'impédance de l'antenne du capteur et R_t l'impédance de l'antenne de la source RF.

2.2.2 Région du champ

L'espace entourant l'antenne est subdivisé en trois régions, voir la Figure 11. La région réactive de champ proche est définie comme étant "la partie de la région de champ proche immédiatement entourant l'antenne, dans lequel le champ réactif prédomine. Pour la plupart des antennes, la limite extérieure de cette zone est généralement située, à une distance $R < 0,62 D^3 / \lambda$ à partir de la surface d'antenne, où λ est la longueur d'onde et D est la plus grande dimension de l'antenne.

Le rayonnant du champ proche (Fresnel) est la région du champ de l'antenne entre la région réactive du champ proche et les champs en champ lointain de la région de rayonnement, dans lequel laquelle prédominent (champ proche) et dans lequel la distribution de champ angulaire est fonction de la distance de l'antenne.

En champ lointain (Fraunhofer), est la région de la zone de l'antenne lorsque la distribution du champ angulaire est essentiellement indépendante de la distance de l'antenne. Si l'antenne a une dimension globale maximale D , la région du champ lointain généralement prises pour exister à des distances supérieures à $2D^2 / \lambda$ de l'antenne.

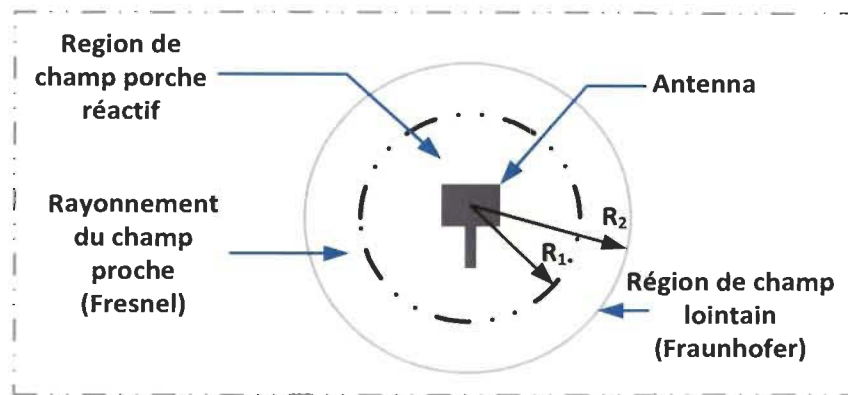


Figure 11 Régions de champ d'une antenne.

2.3 Antenne de l'étiquette

2.3.1 Les principaux types d'antennes de étiquette RFID UHF

Les quatre principaux types d'antennes utilisées dans les antennes UHF utilisées dans la technologie RFID mentionnée dans la littérature sont : les antennes planaire, Les antennes IFA, les antennes à fentes et enfin les antennes dipôles. Dans cette section, on décrira le fonctionnement de chacune de ces technologies.

2.3.1.1 L'antenne imprimée

Dans sa forme la plus simple, une antenne planaire est constituée d'une carte de circuit imprimé recouverte sur les deux faces, la face inférieure est un motif continu. Sur le dessus, un petit rectangle est alimenté par un côté, voir Figure 12. Les antennes planaires peuvent donc être fabriquées à faible coût et à un niveau élevé de reproductibilité en utilisant de la technologie de gravure PCB. Ce type d'antenne est utilisé principalement dans les applications de téléphonie mobile et dans la fabrication d'antennes intelligentes.

La longueur L de l'antenne planaire détermine la fréquence de résonance de l'antenne, avec $h \leq \lambda$, la largeur W influe sur la fréquence de résonance de l'antenne que légèrement, mais détermine la résistance de rayonnement (R_r) de l'antenne, avec $W < \lambda/2$ [3].

$$R_r = \frac{120}{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + (\epsilon_r - 1) \sqrt{4 + \frac{48h}{W}}} \frac{\lambda}{W} \quad (2-4)$$

Si l'antenne planaire fonctionne à sa fréquence de résonance, la différence de phase entre les bords de l'antenne planaire est précisément de 180° .

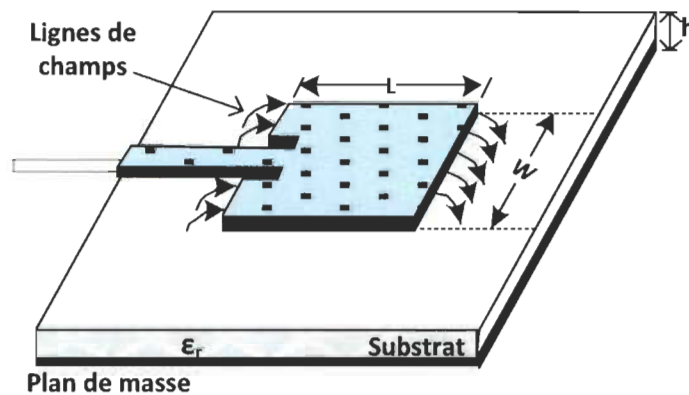


Figure 12 L'antenne imprimée [16].

2.3.1.2 L'antenne IFA

L'antenne imprimée IFA (Inverted-F Antenna) est une sorte d'antenne qui a été développée à la fin du siècle dernier [17]. Ce type d'antenne présente beaucoup d'avantages de l'étiquette tels que la forme simple, le poids léger, la conformité avec la structure, un faible coût de fabrication et une efficacité élevée de rayonnement [17]. La Figure 13 montre la structure d'une antenne imprimée IFA.

L'impédance caractéristique Z_0 de la ligne de transmission peut être définie par l'équation [17] :

$$Z_0 = \frac{\xi_0}{\pi} \ln \left[\frac{H}{d} + \sqrt{\frac{H^2}{d^2} - 1} \right] \Delta 120 \ln \left[\frac{2H}{d} \right] \quad (2-5)$$

Dans cette équation, $\xi_0 = 120\pi$ présente l'impédance de l'onde dans l'air (Air Wave Impedance).

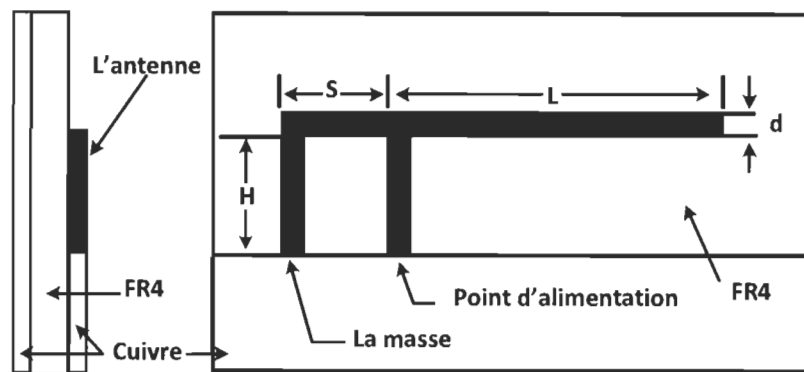


Figure 13 Diagramme de structure d'une antenne IFA [17].

2.3.1.3 L'antenne à fentes

Une antenne à fentes comprend une surface métallique, généralement une surface plane, avec des trous au centre. Lorsque la plaque est entraînée comme une antenne caractérisée par une fréquence, la fente rayonne des ondes électromagnétiques de façon similaire à un dipôle [18]. La Figure 14 montre la cellule unitaire fondamentale du CRLH (Composite Right/Left-Handed). Dans certains cas, la couche supérieure et la couche inférieure sont connectées à travers un réseau de via constituant la structure SIW (substrate integrated waveguide). La fente est gravée sur la face avant du substrat. Elle joue le rôle d'un radiateur. Ce type d'antenne est moins apprécié que les antennes dipôles à cause de ses grandes matières conductrices [18].

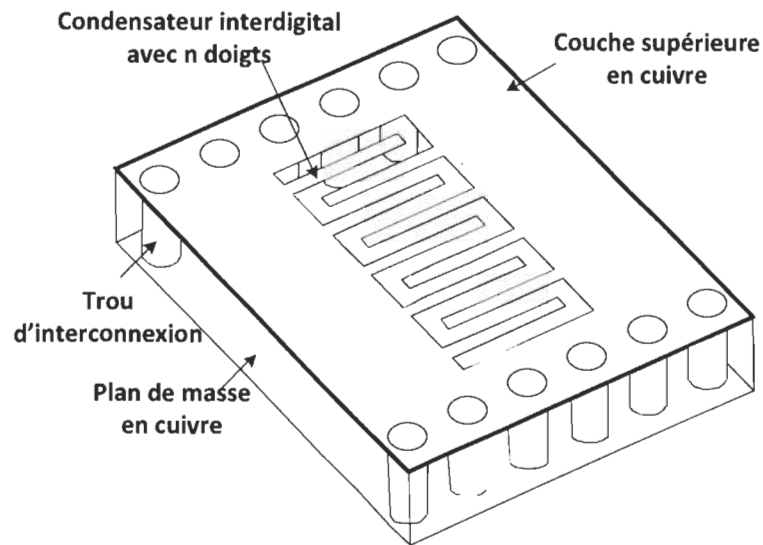


Figure 14 Structure de l'antenne à fentes [18].

2.3.1.4 L'antenne dipôle micro ruban

À cause de sa structure à deux dimensions, l'antenne dipôle est l'antenne la moins utilisée dans les applications RFID ultra haute fréquence. La polarisation linéaire de ce type d'antenne permet d'obtenir un champ de rayonnement omnidirectionnel.

Les antennes micro rubans sont utilisées dans les systèmes de communication sans fil actuels en raison de leur profil bas, leur poids léger et le faible coût de production. Ces facteurs ont été largement étudiés et développés au cours des vingt dernières années. Néanmoins, ce type d'antenne présente beaucoup d'inconvénients. La bande d'opération étroite est l'inconvénient principal. La bande passante de l'antenne imprimée de base est généralement de 1 à 3%. La largeur de bande de l'antenne dépend de la forme de l'antenne imprimée, du constant diélectrique, de l'épaisseur du substrat et bien sûr de la fréquence de résonance [19]. Les dimensions de l'antenne jouent aussi un rôle très

important dans le fonctionnement de l'antenne voir la Figure 15. La formule utilisée pour le calcul de la largeur de l'antenne W et de la longueur d'onde λ est ci-dessous.

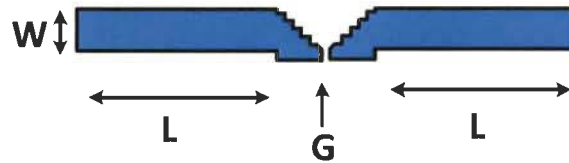


Figure 15 géométrie d'une antenne dipôle micro-ruban [19].

La constante diélectrique effective ϵ_{eff} de la ligne micro ruban est défini par l'équation 2-6 [19] :

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12d/w}} \right) \quad (2-6)$$

Avec :

- ϵ_r constante diélectrique
- d épaisseur du substrat
- w largeur de la ligne micro ruban
- la longueur de la ligne micro ruban est calculée par l'équation :

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2-7)$$

La quantité c représente la vitesse de la lumière, f la fréquence de résonance, ϵ_{eff} la constante diélectrique effective.

$$L = \frac{\lambda}{4} \quad (2-8)$$

Avec L la longueur de l'antenne.

Un certain nombre de mécanismes d'alimentation ont été développés pour les antennes micro rubans. Le plus souvent, c'est le mécanisme d'alimentation qui détermine la complexité de la conception d'antenne microruban. Des techniques populaires d'alimentation peuvent être classifiées dans deux grandes catégories comme suit.

- Directement relié à l'antenne imprimée : une connexion électrique directe est utilisée pour alimenter l'élément rayonnant comme une ligne micro ruban ou une sonde coaxiale. Les lignes d'alimentation microruban sont directement connectées à l'antenne voir la Figure 12. Cette technique est efficace sur des substrats minces ; les substrats épais devraient être évités, car ils pourraient provoquer des rayonnements parasites et des effets de polarisation croisés. L'avantage de l'étiquette de cette technique est que la ligne d'alimentation et l'antenne planaire se trouve sur le même plan.
- Alimentation couplée à l'antenne imprimée : le couplage de champ électromagnétique est utilisé pour alimenter l'antenne imprimée, comme le couplage d'ouverture et de proximité.

Dans ce type de couplage, la ligne d'alimentation se situe entre deux substrats. L'antenne imprimée se trouve sur la face avant du dispositif, alors que le plan de masse se situe sur la face arrière. Le couplage est par nature est de type capacitif, voir Figure 16. Ce

mécanisme d'alimentation fournit plus de 13% de bande passante fractionnelle. Cependant, la complexité de fabrication est plus grande que dans les conceptions précédentes [16].

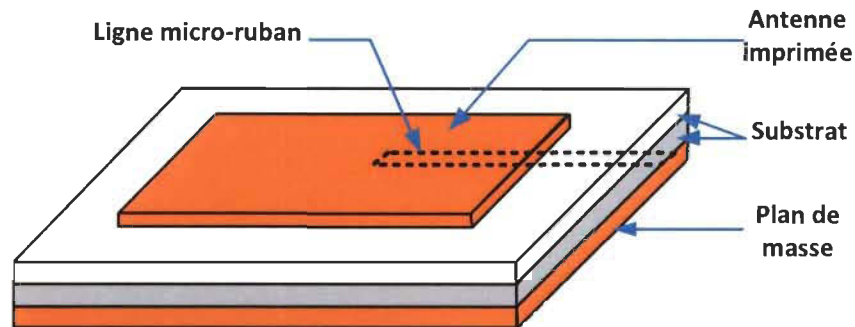


Figure 16 Couplage par proximité [16].

Dans le couplage via une ouverture, la ligne d'alimentation est séparée de l'antenne imprimée par un plan de masse, voir la Figure 17. La largeur de bande de l'antenne peut être augmentée avec l'utilisation du substrat de mousse ou d'air, des résonateurs multiples disposés en structure empilée et des matériaux de pertes. D'ailleurs, le faux rayonnement des lignes d'alimentation est isolé au moyen d'un du plan de masse [20].

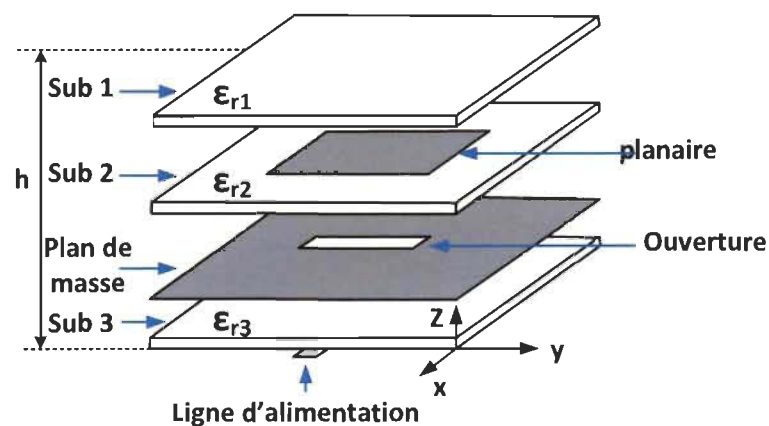


Figure 17 Couplage via une ouverture d'une antenne patch [20].

2.3.1.5 Impédance de l'antenne

Avant de procéder à la fabrication de la puce, la connaissance de la valeur de l'impédance de l'antenne est primordiale. Puisque l'antenne est l'élément de transfert d'énergie (le but c'est de transférer le maximum d'énergie), l'impédance de l'antenne doit être égale au conjugué de l'impédance qui lui est présentée à son entrée.

La mesure en utilisant un balun : le balun fournit un signal d'excitation différentiel à l'entrée de l'antenne et pour éviter le rayonnement des lignes de transmission, voir la Figure 18. Pour veiller à ce que des courants opposés alimentent l'antenne, les deux lignes de transmission doivent être identiques. Pour obtenir l'impédance d'antenne différentielle en utilisant l'analyseur de réseau, il est nécessaire d'analyser le circuit à la sortie de symétrie [21].



Figure 18 Le banc d'essai pour les mesures d'impédance avec un balun [21].

Si l'on fait une comparaison entre les deux techniques, on constate que l'utilisation d'un plan conducteur est plus avantageuse que l'utilisation d'un Balun, parce que cette technique ne nécessite pas l'emploi d'un Balun et offre une isolation de l'antenne du câble de mesure.

2.4 Les capteurs d'hydrogène

2.4.1 Le capteur acoustique

Les dispositifs d'ondes acoustiques de surface, connus comme des dispositifs électroniques, sont largement utilisés dans plusieurs domaines, d'où, le capteur SAW d'hydrogène sans fil est développé pour son faible coût et sa commodité. Le système d'identification par radio fréquence basé sur la technologie SAW, qui peut transmettre par voie hertzienne l'information d'identification sans avoir recours à une source d'alimentation, est proposé pour la première fois en 1972 par Steindl R.

Lorsque les molécules d'hydrogène sont absorbées par la couche du palladium imprimé sur le matériau acoustique comme le présente dans leurs articles Yuri Tikhov, et Yongjin Kim [22], voir Figure 19, ce phénomène perturbe les propriétés des ondes acoustiques de surface. Pour cette raison, l'hydrogène peut être détecté par la mesure du changement dans la fréquence, l'amplitude, ou la phase des ondes transmis. L'adsorption de l'hydrogène provoque une diminution dans la densité et dans le module de Young d'élasticité. Le capteur acoustique est compatible avec la fabrication en microélectronique et adapté à l'intégration réseau. Toutefois, cette sensibilité est limitée par les bruits des lignes et devient instable dans les températures élevées [23].

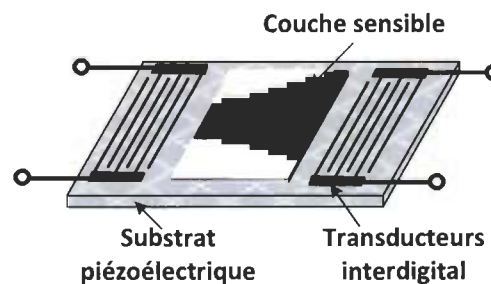


Figure 19 Structure d'un capteur acoustique [24].

L'impulsion d'interrogation ~~émit~~ émise par le lecteur et reçue par l'antenne, et transformée en ondes acoustiques réfléchiées par les réflecteurs arrangés dans un ordre pour déterminer le code d'identification. À chaque réflecteur une partie de l'onde est réfléchiée, puis transformée en une impulsion radiofréquence retransmise au lecteur [3]. Selon l'ordre d'arrangement des réflecteurs, on peut réaliser un code permettant afin d'identifier chaque capteur. La Figure 20, montre le signal de réception au niveau du lecteur.

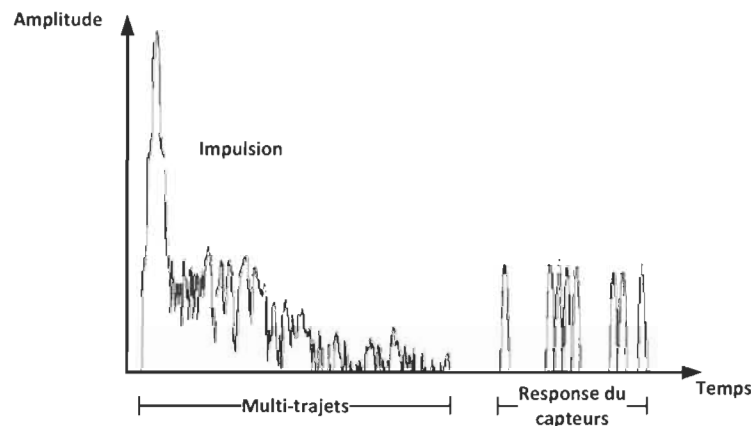


Figure 20 Réponse d'une étiquette acoustique (SAW) [3].

2.4.2 Le capteur catalytique

Le principe de fonctionnement du capteur catalytique se résume à la réaction du gaz combustible avec l'oxygène sur la surface catalytique qui libère de la chaleur [24]. Ce principe peut être appliqué pour détecter les gaz combustibles, y compris l'hydrogène. Les capteurs catalytiques se subdivisent en deux catégories soient : les capteurs thermoélectriques et les capteurs Pellistor.

Le capteur thermoélectrique génère un signal électrique en se basant sur l'oxydation exothermique catalysée par l'hydrogène, mais l'utilisation de l'effet thermoélectrique est

exploitée pour générer le signal électrique. L'effet thermoélectrique, ou plus précisément l'effet Seebeck, est caractérisé lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un matériau conducteur ou semi-conducteur qui se traduit par une différence de tension entre ces points. Dans un capteur d'hydrogène thermoélectrique l'augmentation de la température à la partie active du capteur est due à l'oxydation de l'hydrogène et de la tension induite thermoélectrique qui est en corrélation avec la concentration d'hydrogène.

Le capteur d'hydrogène de type Pellistor se compose de deux bobines de platine incorporées chacune de perles de céramique (l'alumine poreuse), voir la Figure 21. Les bobines de platines ont deux fonctions : Elles agissent comme un appareil de chauffage ainsi qu'un thermomètre à résistance. La surface de l'une des perles est activée avec un catalyseur approprié qui est généralement un métal noble comme le platine ou le palladium. L'autre perle n'a pas de catalyseur sur sa surface et agit comme un élément de compensation [24].

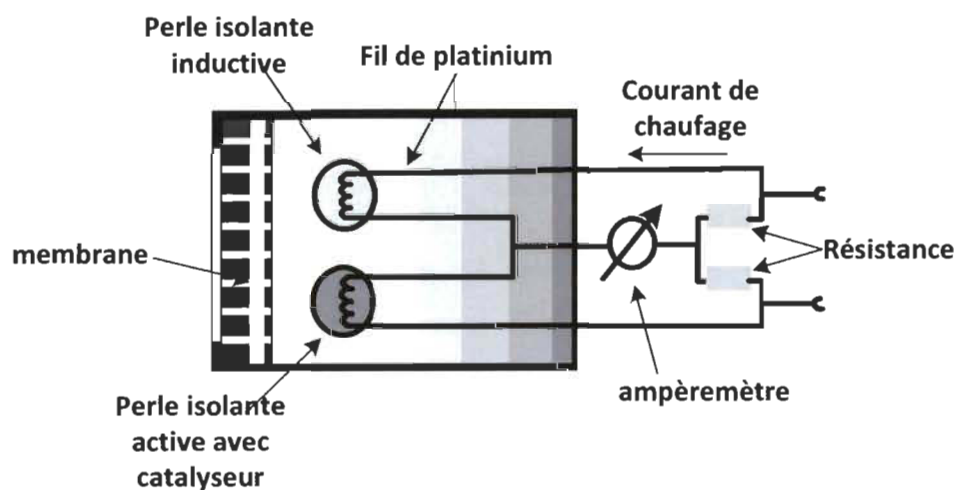


Figure 21 Montage en pont de Wheatstone reliant les perles actives et inactives dans le Pellistor [24].

2.4.3 Capteur basé sur la conductivité thermique

Le principe de fonctionnement est basé sur la perte de chaleur mesurée d'un corps chaud au gaz environnant. La résistance de détection exposée au gaz étant mesurée tandis que la résistance de référence est scellée dans une chambre contenant un gaz de référence (habituellement l'air) [24]. Typiquement les deux charges sont reliées dans un montage en pont de Wheatstone comme le montre la Figure 22. Quand les deux résistances sont exposées au même gaz, elles perdent la chaleur au même taux, qui a comme conséquence une lecture nulle. Quand la résistance de détection est exposée au mélange de gaz cible, elle perd plus ou moins de chaleur selon la conductivité thermique du gaz relativement au gaz de référence. Ceci mène alors à une augmentation ou à la diminution de la température de la perle (Bead) et par conséquent à un changement de sa résistance qui est mesuré comme un déséquilibre dans le pont de Wheatstone.

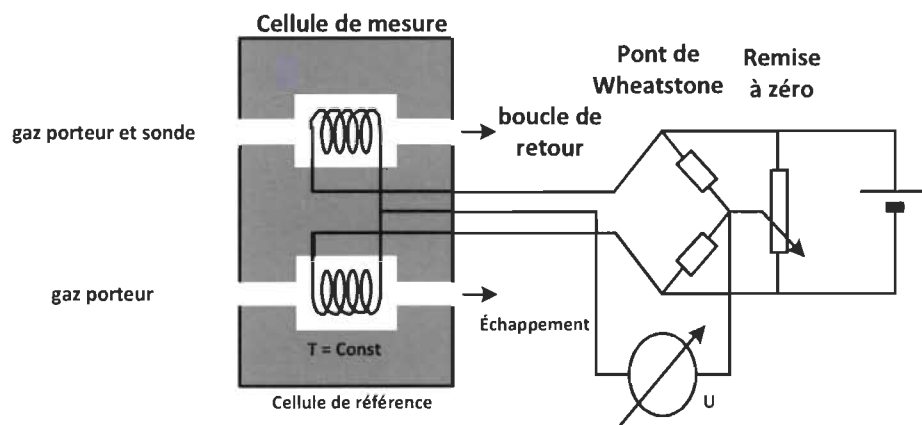


Figure 22 Cellule de mesure et de référence d'un capteur de conductivité thermique connecté dans un circuit à pont de Wheatstone [24].

2.4.4 Le capteur optique

Les capteurs d'hydrogène optiques basés sur des films d'oxydes métallique de transition, tel que l'oxyde de tungstène (amorphe $\alpha\text{-WO}_3$), répond mieux aux règles des prescriptions de sécurité, car ils n'ont pas besoin d'alimentation en courant. Les couches de d'oxyde de tungstène revêtus d'une couche de platine mince active, par l'action de l'hydrogène moléculaire, prend une couleur bleu foncé, dont l'intensité de l'hydrogène du mélange air est déterminée par la concentration H_2 . Schématiquement le principe d'une telle décoloration du film WO_3/Pt à son immersion dans un électrolyte, est décrite dans la Figure 23 [25]. Pour l'incarnation de la décoloration, l'équipe de recherche a employé une cellule transparente qui contient le film sensible WO_3/Pt au gaz hydrogène superposé à un verre avec la couche de conduite transparente SnO_2 . La cellule est équipée de trois trous, deux de dessus pour l'entrée-sortie du gaz et un de dessous pour la livraison de système d'aquatique. Sensible à l'hydrogène, le film d'une telle sonde optique est devenu sans couleur par réduction périodique en contact avec $0.1\text{N H}_2\text{SO}_4$.

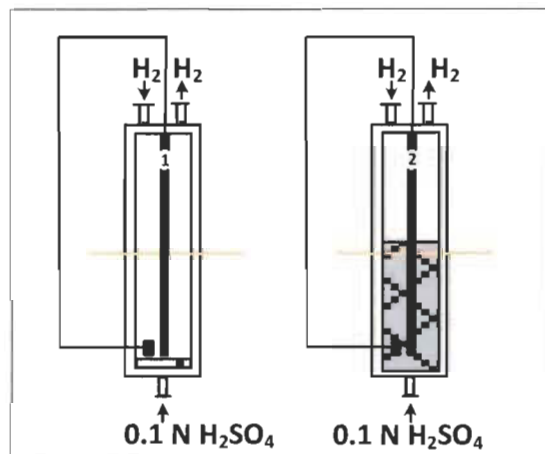


Figure 23 Capteur optique d'hydrogène dans lequel l'invite de la décoloration rapide du film WO_3/Pt se produit au cours de l'injection de la solution dans une cellule : 1 - niveau de la solution est soulevé ; 2- niveau de la solution est abaissé. [25].

2.4.5 *Le capteur électrochimique*

La technologie des capteurs électrochimiques de couche mince s'est développée à partir des matériaux classiques de la technologie de couche épaisse (thick-film technology). En règle générale, le signal du courant de sortie du capteur électrochimique de couche mince dépend du design du capteur, des matériaux, des paramètres technologiques, de la production du packaging du transport et d'emmagasinement [26].

Les capteurs électrochimiques se classifient en deux catégories, le capteur potentiométrique et le capteur ampérométrique, comme le montre la Figure 24. Ce genre de capteurs présente beaucoup d'avantages, tels que son fonctionnement à la température ambiante avec une faible consommation d'énergie, comme il offre une très grande sélectivité et une sensibilité meilleure au gaz d'hydrogène. Les inconvénients incluent le fait que la concentration de l'électrolyte varie avec la variation de l'humidité et que cet électrolyte nécessite une hydratation dans les périodes de polarisation [2].

Le capteur ampérométrique fonctionne à une tension constante appliquée. Le signal du capteur est une diffusion limitée de courant. Un examen des capteurs de gaz ampérométriques est donnée par Stetter et Li. Il existe trois principaux constituants d'un capteur ampérométrique, comme illustré dans la Figure 24. Le premier composant est l'électrode, au cours desquelles se produit un transfert d'électrons. L'ensemble de base nécessite jusqu'à deux électrodes - l'électrode de travail ou de détection et la contre-électrode. Cependant, la plupart des capteurs comprennent également une électrode de référence et un potentiostat est couramment utilisé pour maintenir la tension constante. Les électrodes sont généralement composées d'un métal noble, souvent le platine, qui agit également comme catalyseur pour la réaction d'oxydation de l'hydrogène.

D'autre part, une cellule électrochimique contenant un électrolyte solide ou liquide afin de permettre le transport d'ions entre les électrodes. Dans la détection d'hydrogène, l'électrolyte est généralement un matériau conducteur de protons. L'électrolyte liquide le plus couramment utilisé est l'acide sulfurique. Cependant, l'utilisation d'un électrolyte solide élimine les problèmes de fuite, de corrosion et de volatilisation qui peuvent survenir dans le cas des électrolytes liquides.

Enfin, une couche perméable aux gaz recouvre l'entrée de l'électrode de détection et permet de limiter la diffusion de telle sorte qu'il devient l'étape de détermination de vitesse. Cette couche sert également à empêcher les fuites ou le dessèchement de l'électrolyte et, si le matériau approprié est utilisé, pour permettre le passage sélectif de la substance à analyser uniquement ce qui empêche les interférences des autres gaz.

Les capteurs potentiométriques diffèrent de capteurs ampérométriques en ce qui concerne le fonctionnement idéalement à zéro du courant et de la quantité mesurée est la différence de potentiel ou de force électromotrice entre l'électrode de détection et l'électrode de référence. La structure d'un capteur potentiométrique de base est semblable à celle de l'ampérométrie, constitué par deux électrodes en contact avec un électrolyte. Les électrodes sont généralement fabriquées à partir d'éléments nobles tels que le palladium, le platine, l'or ou de l'argent

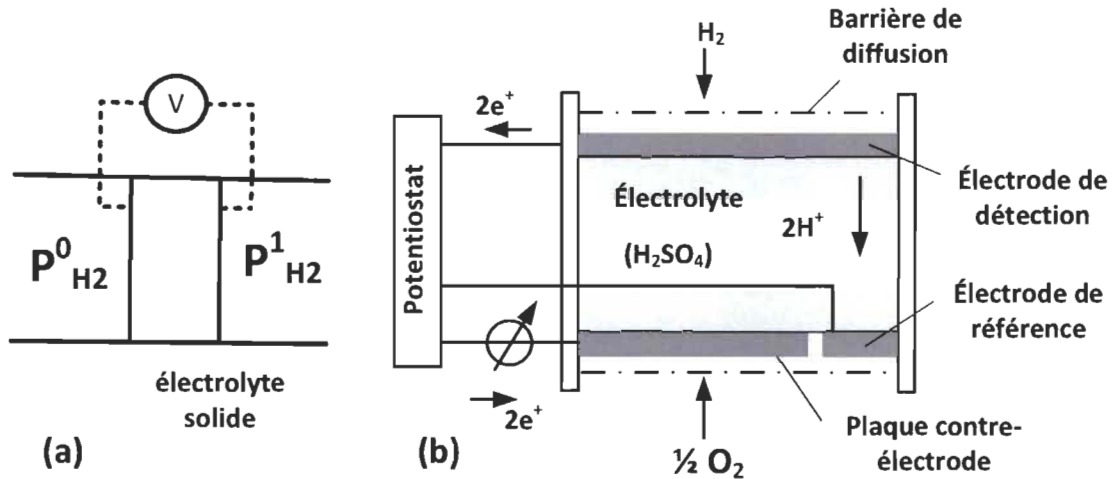


Figure 24 Représentation schématique (a) d'un capteur d'hydrogène potentiométrique (b) et d'un capteur de limitation de courant ampérométrique [2].

2.4.6 Les capteurs MOS

2.4.6.1 Diode à jonction p-n

La diode à jonction p-n est l'un des semi-conducteurs les plus anciennes. Le dopage sélectif de semi-conducteur avec des impuretés de type n dans une région et avec des impuretés de type p dans la région adjacente crée la jonction p-n [27], voir la Figure 25.

Néanmoins, la réponse des capteurs à base de diodes à jonction p-n ont tendance à être plus faible que les autres basés sur le carbure de silicium comme est décrit dans les sections suivantes. Muntel et al [27], ont fabriqués le capteur à base de jonction p-n avec une implémentation des ions du palladium (Pd) dans le matériau 6H-SiC de type-n. La réponse au gaz d'hydrogène a été mesurée comme de petites variations dans le courant dû au changement dans le gaz ambiant qui varié entre l'air et une concentration d'hydrogène

de 4% dans l'argon. La température variant de 23 °C à 240 °C. Il a été observé que les tensions supérieures à 1.2V provoquent le claquage de la jonction p-n [27].



Figure 25 diode à jonction p-n [27].

2.4.6.2 Les capteurs à base de diode Schottky

Les capteurs de type Schottky comprennent un métal en contact avec un matériau semi-conducteur (MS) ou d'un métal en contact avec une fine couche isolante (généralement un oxyde) sur un matériau semi-conducteur voir la Figure 26. L'acronyme MIS (métal isolant semi-conducteur) est utilisé de façon indépendante sans tenir compte du fait que la grille est en fait réalisé en métal ou si l'isolant est le dioxyde de silicium. Le MOS (métal-oxyde-semi-conducteur) est un cas particulier de la structure MIS générique. Quand un métal est mis en contact avec un semi-conducteur, le niveau de fermi du semi-conducteur s'ajuste et se conforme avec le niveau de fermi du métal dominant par une valeur égale à la différence des deux fonctions de travail des deux matériaux (hauteurs de la barrière Schottky). Cet ajustement des niveaux de fermi se produit également s'il y a une couche isolante très mince, SiO_2 , entre le métal et le semi-conducteur [27].

Le palladium et le platinium sont les métaux les plus souvent utilisés dans les capteurs de type Schottky pour la détection d'hydrogène, la polarisation de ces métaux forment une couche dipolaire, qui change la fonction de travail du métal et par conséquent la barrière Schottky. Ce changement dans la barrière Schottky entraine un

changement dans les caractéristiques courant-tensions, et donc la réponse peut être mesurée comme le changement de la tension lorsque la diode est polarisée au courant de polarisation constante. Parmi les matériaux les plus utilisés comme couche isolante dans les diodes Schottky on trouve : le dioxyde de zinc(ZnO), SnO_2 , Indium (III) oxide In_2O_3 , KT crystal(KTaO_3) [27].

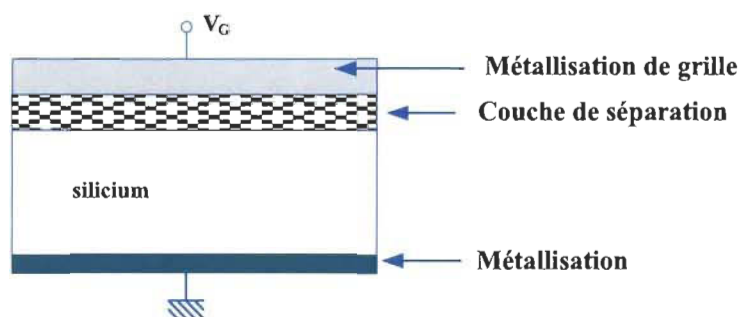


Figure 26 Structure d'une diode Schottky [27].

2.4.6.3 Les capteurs à base de transistor à effet de champ

Les capteurs d'hydrogène MISFET (transistor métal-isolant-semi-conducteur à effet de champ) ou MOSFET(transistor métal-oxyde-semiconducteur à effet de champ) sont un autre type de capteurs semi-conducteur qui utilisent un transistor à effet de champ (FET) pour transformer le changement dans la fonction de travail de la porte métallique catalytique en présence d'hydrogène en un signal électrique lié à la concentration d'hydrogène. Les capteurs basés sur cette technologie ont été rapportés pour la première fois par Lundström et al [27] .

Les capteurs d'hydrogène MOSFET utilisent généralement le platine, le palladium ou un alliage contenant ces métaux en tant que matériau de grille catalytique déposé sous forme de film mince sur la couche d'oxyde. Les molécules d'hydrogène s'adsorbent sur la

surface métallique, se dissocie en atomes et ensuite se diffuse à travers la porte à l'interface métal-isolant. Les atomes d'hydrogène absorbés forment une couche de dipôle qui change la fonction de travail du métal et conduit à un changement de tension dans le signal de capteur [27], voir la Figure 27.

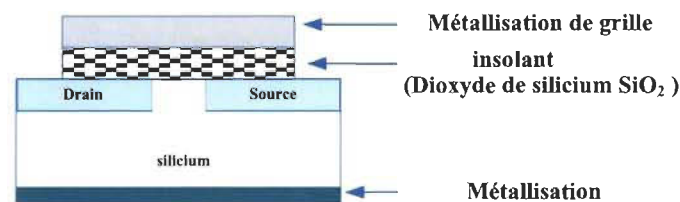


Figure 27 Digramme bloc du capteur à transistor à effet de champ [27].

2.4.6.4 Les capteurs capacitifs MOS

Les capacités MOS consistent simplement en un arrangement de la couche d'oxyde entre une couche métallique qui joue le rôle de couche sensible au gaz et le substrat semi-conducteur. L'absorption du gaz par le palladium durant la période d'électrolyse a été observée pour la première fois par Thomas Graham en 1868. Les capteurs capacitifs MOS sont reportés pour la première fois par Steele et al en 1976 [24]. La technologie qu'utilise ce genre de capteur pour mesurer la concentration d'hydrogène se base sur la variation de la capacité MOS, voir Figure 28. Les capacités MOS sont largement similaires dans leurs structures aux diodes, cependant la couche isolante en oxyde est mince dans le but d'arrêter la conduction du courant et pour faciliter l'accumulation des charges sur les deux côtés.

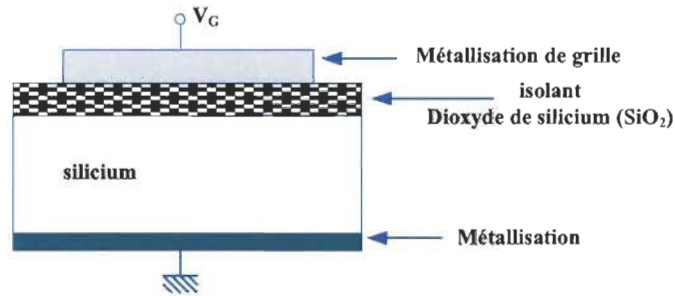


Figure 28 Diagramme bloc d'une capacité MOS [27].

Puis, nous discuterons de l'effet de la couche mince de palladium dans ce type de capteur d'hydrogène. On va élaborer aussi une étude des caractéristiques des interactions au niveau de la surface palladium-hydrogène. À vrai dire, pour comprendre le fonctionnement des capteurs de gaz d'hydrogène, non seulement il faut comprendre la physique du dispositif MOS, mais aussi il faut comprendre le mécanisme du métal catalytique.

2.5 Principes de la capacité MOS

La capacité MOS est composée d'une électrode métallique et d'une couche en semi-conducteur avec un isolant (généralement une couche d'oxyde de silicium) entre les deux couches. Dans ce type de dispositif, l'épaisseur de la couche d'oxyde varie entre 3 et 100 nm [28]. Dans ce cas, la grille en silicium et le canal du MOS représentent les plaques du condensateur, conduction d'hydrogène à travers la couche d'oxyde et accumulation à l'interface Si/SiO₂. La capacité de ce composant varie non linéairement, avec une variation de polarisation de la grille du MOS, à travers trois phases, voir la Figure 29:

- Figure 29 la phase d'accumulation
- la phase de déplétion

- la phase d'inversion

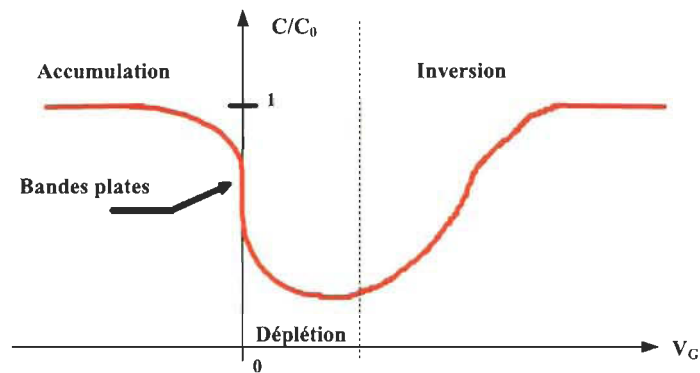


Figure 29 Courbe CV de basse fréquence pour une capacité MOS de type p.

Pour comprendre les mesures de la courbe capacité-tension, il est nécessaire d'abord de tenir compte de la dépendance de la fréquence de la mesure. Cette dépendance de fréquence se produit principalement dans l'inversion, puisque la production des porteurs minoritaires dans la couche d'inversion nécessite un minimum de temps. L'équilibre thermique n'est alors pas obtenu immédiatement. Nous récapitulons que la capacité totale de la structure MOS est la combinaison de capacités séries différentielles de silicium par unité de surface, C_s , et la capacité d'oxyde C_o [29], la capacité de la couche de silicium inclue la capacité de la couche d'inversion C_{inv} et la capacité C_d qui représente la capacité de la couche de déplétion. La capacité de la couche d'accumulation définie par la capacité C_{acc} et enfin la capacité C_{it} de l'état d'interface, voir la Figure 30 [30].

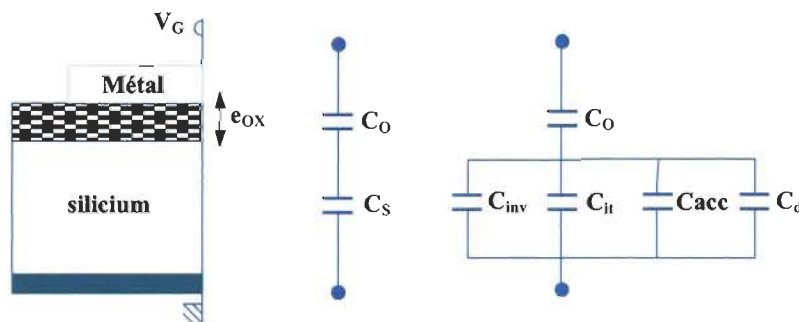


Figure 30 Circuit équivalent d'une capacité MOS [30].

L'application d'une tension de grille négative très inférieure à la tension de la bande plate fait en sorte que la surface du semi-conducteur devienne fortement accumulée, de sorte que la capacité d'accumulation (C_{acc}) est très élevée, comme l'indique la courbe présentée dans la Figure 31, dominant ainsi les autres capacités parallèles [30].

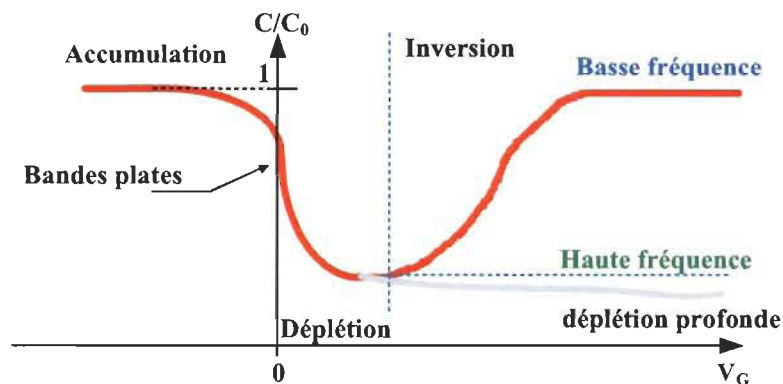


Figure 31 Effet de la fréquence sur le profil C-V pour une capacité MOS

Les porteurs majoritaires, sont attirés par la tension appliquée, conduisant à une accumulation des porteurs majoritaires dans l'interface semi-conductrice-isolant, comme l'illustre la Figure 32. L'épaisseur de la couche d'oxyde (t_{ox}) est déterminée dans la mesure C-V en déterminant la capacité isolante, puis en reliant la capacité de la couche

isolante à l'épaisseur [30]. La relation liant la capacité isolante à l'épaisseur est simple, elle est exprimée par l'expression ci-dessous :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} A_g \quad (2-9)$$

Où ϵ_{ox} définit la constante diélectrique de la couche d'oxyde et A_g l'aire de la grille du dispositif, t_{ox} l'épaisseur de la couche d'oxyde. En fait, la constante diélectrique de la couche d'oxyde est habituellement supposée égale à 3.9 [4].

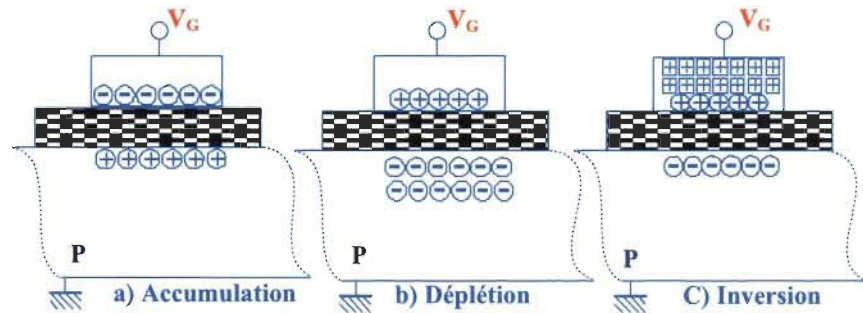


Figure 32 Coupe du condensateur MOS.

Pour une tension de grille comprise entre accumulation et inversion, le semi-conducteur entre dans le régime de déplétion. La capacité totale mesurée correspond à la combinaison de la capacité de la couche d'oxyde (C_{ox}) en série avec la capacité de déplétion (C_d), qui est à son tour en parallèle avec la capacité d'état d'interface (C_{it}). Dans le régime d'inversion, si la fréquence du signal est basse, la capacité de la couche d'inversion domine les autres capacités, alors la capacité totale mesurée est aussi (C_{ox}) [30], exprimée par l'expression 2-10. Si la polarisation de grille V_G et la tension de mesure de petit signal varient à une vitesse plus rapide à ce que peut être permis par recombinaison/génération sur la surface, alors, aucune couche d'inversion ne se forme et le dispositif MOS entre dans l'épuisement profond [31] [32].

$$C_{LF} = \frac{1}{\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{S,LF}}} \quad (2-10)$$

Avec :

- $C_{S,LF}$ représente la capacité du semi-conducteur en basse fréquence
- C_{LF} représente la capacité MOS en basse fréquence

Si la fréquence du signal alternatif est grande, et le taux de balayage de la polarisation est faible, les charges d'inversion ne peuvent plus suivre le signal alternatif. La capacité du semi-conducteur devient une capacité de déplétion associée à la largeur de la couche de déplétion comme l'indique l'équation 2-11. Toutefois, la capacité en haute fréquence mesurée dans la phase d'inversion est la combinaison de la capacité de la couche d'oxyde avec la capacité de la couche d'inversion dans la bande d'inversion [30].

$$C_{HF} = \sqrt{\frac{qN_a}{4\phi_F}}, \text{ pour } V_g - V_{FB} > 2\phi_F + \sqrt{\frac{4qN_a\epsilon_s\phi_F}{C_{ox}}} \quad (2-12)$$

Avec :

- qN_a la densité de charge
- V_{FB} tension de la bande plate
- ϵ_s constant diélectrique du semi-conducteur
- ϕ_F potentiel de référence

La différence entre les fréquences hautes et basses correspond si la couche d'inversion peut suivre le signal de test appliqué [30].

2.5.1 Mécanisme de détection d'hydrogène

Ces dispositifs montrent un changement dans la capacité et la conductance lorsqu'ils sont exposés à l'hydrogène. Dans leur article, Shivaraman et al. [33], expliquent ce changement dans les caractéristiques du dispositif MOS par la diminution de la fonction de travail du palladium après exposition à l'hydrogène [28]. Formoso et Maclay ont reporté que la présence d'hydrogène, les densités d'états d'interface de la fine couche du palladium-grille MOS augmente avec l'augmentation de la concentration du gaz d'hydrogène [34]. Une description approfondie du système palladium-hydrogène est donnée par F.A Lewis [35]. Figure 33 montre que dans les basses températures, l'hydrogène est plus soluble dans le palladium que dans les autres métaux.

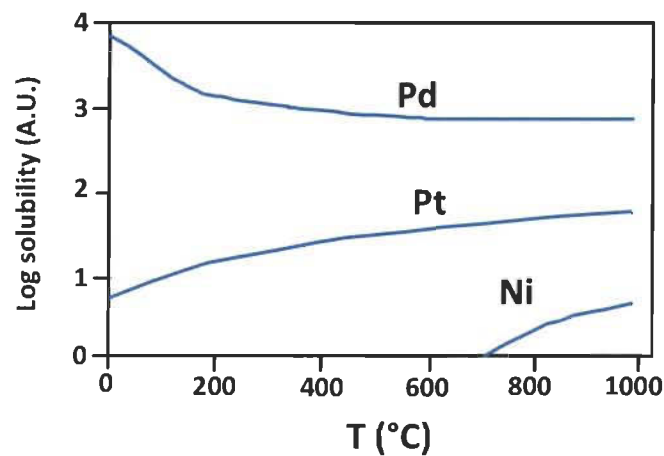


Figure 33 Schéma de comparaison de la solubilité de l'hydrogène dans le Pd, le Pt et le Ni en fonction de la température à une pression égale à 1 atm [35].

Armgrath et al ont fait une comparaison entre le palladium et le platine comme métaux de détection dans le capteur capacitif MOS, les deux chercheurs ont trouvé que le

Pd est souhaitable pour la détection de faible concentration de gaz d'hydrogène, alors que le Pt est utilisé pour les fortes concentrations [36].

2.5.2 Théorie des bandes dans capteurs

La théorie des bandes appliquée dans les capteurs de gaz a été le sujet d'études intense pendant plusieurs années [37]. Le gaz cible réagit avec la surface de la couche d'oxyde (généralement à travers l'absorption des ions d'oxygène), qui provoque un changement dans la concentration des porteurs de charge du matériau [38]. Ce changement dans la concentration des porteurs de charge sert à l'altération de la conductivité (ou la résistivité) du matériau. Pour les semi-conducteurs de type p qui conduisent avec des trous positifs qui deviennent des porteurs de charges majoritaires, d'où, l'effet d'opposition est observé avec le matériau qui montre une augmentation dans la conductivité lors la présence de gaz d'oxydation (ou le gaz augmente le nombre de trous positif). La résistance augmente avec la réduction du gaz, où la charge négative introduite dans le matériau réduit la concentration des porteurs de charges positives [39]. Le Tableau 1 suivant nous donne une comparaison des réponses ente les semi-conducteurs de type p et de type n.

Tableau 1 Signe de variation de la résistance (augmentation ou diminution) dans la présence du gaz

Classification	Gaz d'oxydation	Réduction de gaz
type n	Augmentation de la résistance	Diminution de la résistance
type p	Diminution de la résistance	Augmentation de la résistance

Le dispositif fonctionne de la façon suivante, d'abord les molécules d'hydrogène sont dissociées en atomes dans la surface de la couche sensible (Palladium), car comme il a été expliqué dans une section précédente, le palladium agit comme un catalyseur. En conséquence, la majorité de ces atomes sont diffusée dans la couche sélective et absorbés par l'interface de la couche isolante du dispositif (SiO_2) [2]. La Figure 34 illustre le mécanisme de détection du gaz d'hydrogène dans la couche mince de palladium. Le principe de détection du gaz d'hydrogène par le capteur MOS est décrit par les étapes suivantes :

- La dissociation et l'absorption des molécules d'hydrogènes sur la surface du palladium. Se fait en fonction de l'équation :
- La diffusion des atomes d'hydrogènes jusqu'à l'interface Pd/ SiO_2 .
- La canalisation de l'hydrogène à travers la couche d'oxyde et accumulation à l'interface Si/ SiO_2 .
- La formation des états d'interface dus à la réaction des atomes d'hydrogène avec des pièges d'interface.

$$X + H^+ = I_t \quad (2-13)$$

Où X = le réactant à l'interface Si/ SiO_2 , H^+ = concentration d'hydrogène, et enfin I_t = l'état d'interface.

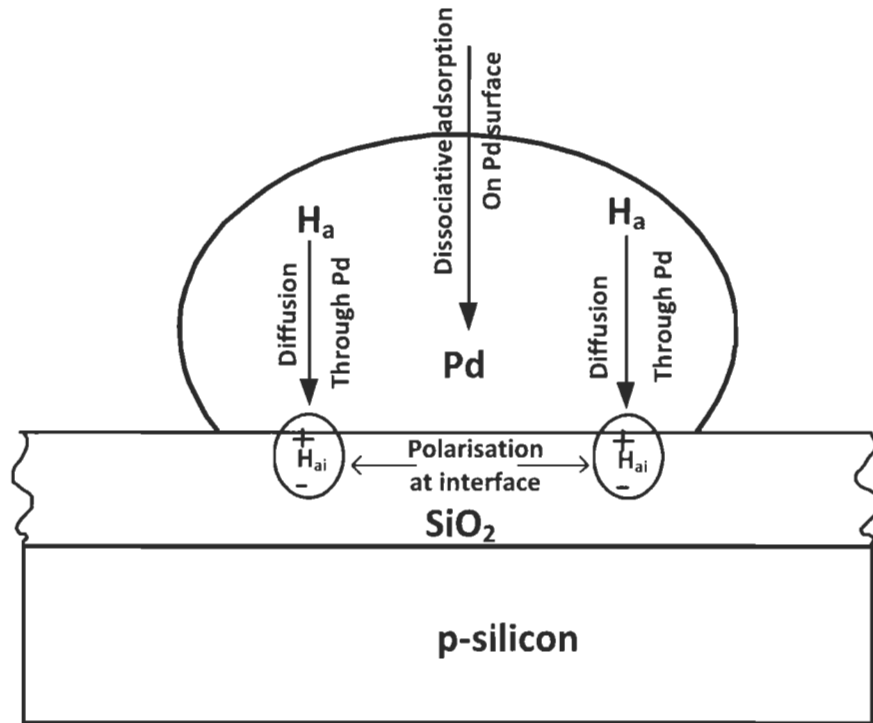


Figure 34 Schéma illustrant le principe d'un capteur d'hydrogène de type MOS basé sur une couche SiO_2 [28].

2.5.3 Tension de la bande plate

Si aucune tension n'est présente dans la couche d'oxyde ou dans l'interface oxyde-semi-conducteur, la tension de la bande plate est égale à la différence entre la fonction de travail du métal et la fonction de travail du semi-conducteur.

$$V_{FB} = \phi_m - \phi_s \quad (2-14)$$

La fonction de travail est la tension nécessaire pour extraire des électrons du niveau de fermi au niveau de vide. Cette tension est comprise entre 3 et 5 volts pour la plupart des métaux [40].

Pour un condensateur de type pMOS, ayant un substrat de type n avec une densité de dopage N_d , la différence de fonction de travail est égal à:

$$V_{FB} = \phi_m - \phi_s = \phi_m - \chi - \frac{E_g}{2q} + V_t \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2-15)$$

Avec χ représente l'affinité électronique (electron affinity) dans le semiconducteur, $V_t \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right)$ le potentiel au niveau du substrat, N_d la densité de dopage du substrat, E_g énergie de bande interdite du silicium, V_t la tension de seuil.

Il est connu que les capacités MOS utilisés comme détecteurs, se basent sur le décalage de la tension de la bande plate, et, en conséquence, le décalage latéral de la réponse tension-capacité après exposition à l'hydrogène, voir la Figure 35. Il a été observé que le changement dans la tension de la bande plate augmente avec la concentration du gaz [41] [40]. La méthode consiste simplement à tracer la réponse capacité vs tension de durant le processus d'hydrogénisation.

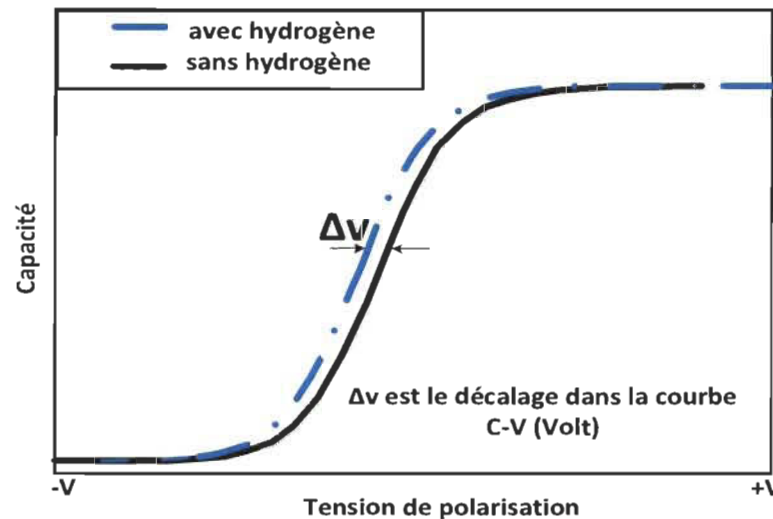


Figure 35 Effet du gaz d'hydrogène sur la réponse d'une capacité MOS [28]

2.6 Performances des capteurs d'hydrogène

L. Boon-Breet et J. Bousek ont effectué plusieurs tests sur les différents types de capteurs d'hydrogène. Les performances revendiquées pour les paramètres sélectionnés sont classées en fonction de certains paramètres (température, humidité, temps de réponse...). De cette façon, il est possible de comparer les technologies de détection et d'analyser dans quelle mesure chacun est capable de répondre aux exigences de performance pour les diverses applications [42].

2.6.1 Temps de réponse et de récupération

Le temps pris par un capteur pour répondre à la présence d'hydrogène l'un des critères les plus importants à prendre en considération. Il est impératif que les capteurs répondent à la présence de l'hydrogène dans l'air. Le temps de réponse (t_{90}) est généralement exprimé comme intervalle de temps entre la variation instantanée de l'air pur à un mélange d'hydrogène et le moment où la réponse atteint 90% de l'indication (maximum) finale. De même, le temps de récupération (t_{10}) est généralement exprimé en l'intervalle de temps entre la variation instantanée du mélange d'hydrogène à l'air pur et le moment où la réponse du capteur atteint 10% de la valeur initiale (maximum) l'indication [42].

Figure 36 montre les temps de réponse des capteurs d'hydrogène disponibles groupés selon le principe de fonctionnement. Des temps de réponse sont donnés pour presque tous les capteurs examinés. Le temps de réponse du capteur MOSFET est supérieur de celui des autres capteurs (électrochimiques et MOS) qui ont un temps de réponse de 5s ou moins. Tous les capteurs MOx répondent dans 20s ou moins, dû peut-être à leur petite

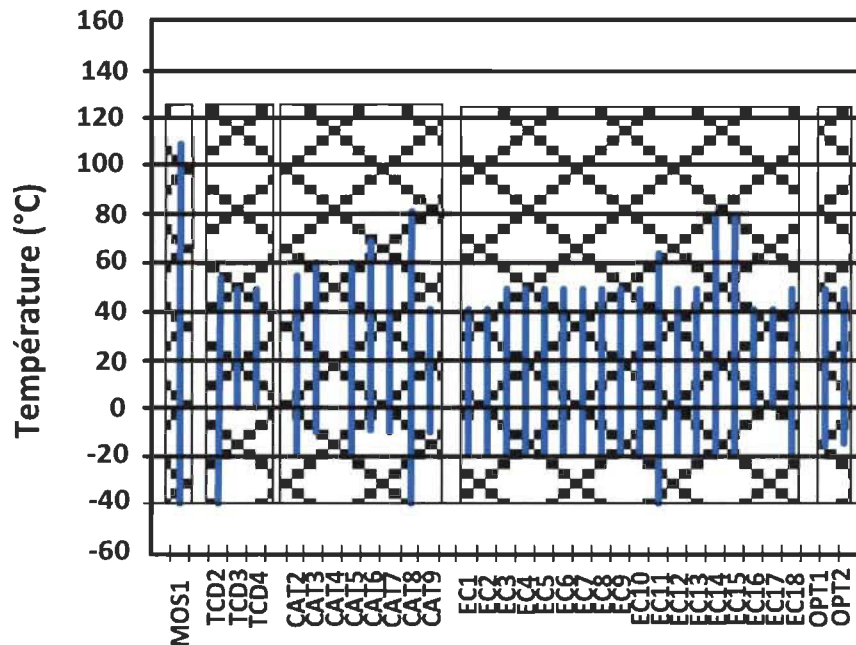


Figure 37 Gammes de température de fonctionnement des Plage de pression.

Figure 38 montre les plages de pression de fonctionnement des capteurs d'hydrogène. La figure montre également la gamme de pression de fonctionnement désirée par des fabricants d'automobiles, pression de 62-107kPa, qui se compare avec celle proposée dans la norme ISO pour des applications stationnaires, pression de 80-110kPa [42]. Comme on peut le voir, les capteurs MOS se trouvent parmi ces applications, car la pression d'utilisation de ces dispositifs varie de 70 à 130kPa, qui est préférable, parce qu'ils offrent une plus grande marge de sécurité en cas d'accidents.

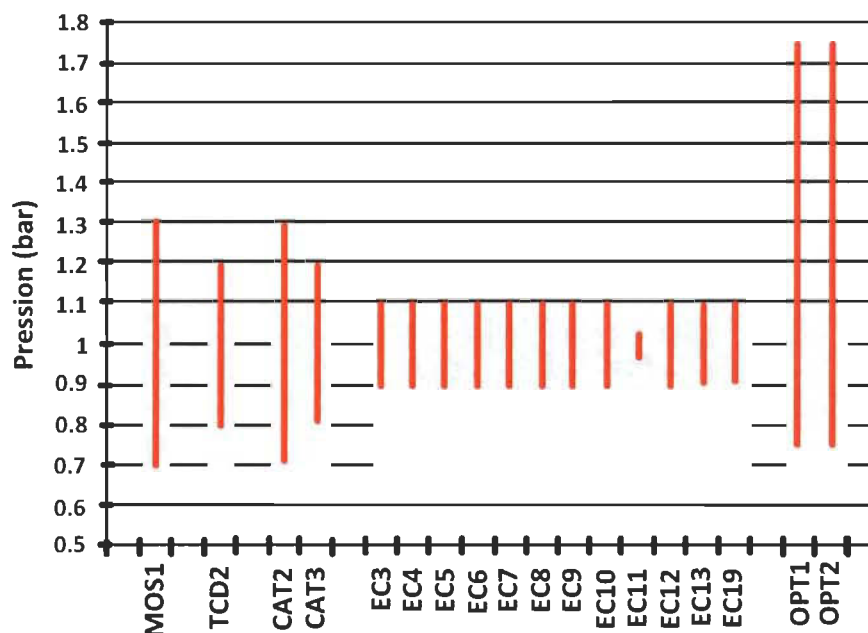


Figure 38 Gammes de pression de fonctionnement des capteurs d'hydrogène spécifiées par les fabricants et groupées selon le principe de fonctionnement [42].

2.6.3 Plage d'humidité ambiante

Les automobiles sont également une application exigeante pour les capteurs d'hydrogène par rapport à la plage d'humidité. Tous sauf un des constructeurs automobiles interrogés exigeaient une exploitation humidité relative (HR) gamme de 0 à 95%. Cette gamme peut être considérée comme une indulgence humidité relative supérieure à 95% est réalisable dans des conditions météorologiques spécifiques, même à l'intérieur d'un véhicule, et la condensation ne peut pas toujours être exclue. Ce point de vue se reflète dans l'objectif de la plage de fonctionnement 0-100% proposé pour les applications automobiles par le DoE américain. Comme pour les autres paramètres, l'influence de l'humidité sur la réponse des capteurs est rarement spécifiée par les fabricants.

Figure 39 montre les plages de fonctionnement d'humidité relative (lorsqu'il est fourni) des capteurs d'hydrogène disponibles telles que spécifiées par le fabricant et regroupés selon le principe de fonctionnement. La figure montre également les capteurs opérant dans la plage d'humidité relative de 0 à 100% HR. Seuls deux capteurs (un catalyseur et deux semi-conducteurs à oxyde de métal) ont pu travailler jusqu'à 100% d'humidité relative, mais les conditions du non condensation ont été précisées par les fabricants.

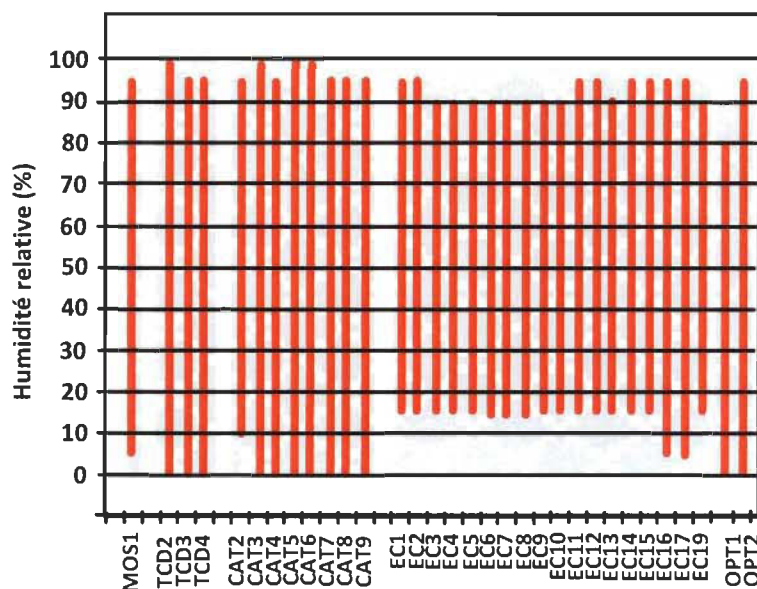


Figure 39 Plage d'humidité relative du fonctionnement des capteurs spécifiées par les fabricants et regroupés selon le principe de fonctionnement [42].

Les spécifications de performances pour chaque type de technologie de tous les modèles examinés sont récapitulées dans le Tableau 2. Le transistor MOSFET et les capteurs électrochimiques ne répondent pas aux exigences d'humidité. Au niveau de la durée de vie, les capteurs MOS ont une durée de vie plus longue, et fonctionnent à des températures extrêmes (-40 à 100°C), sous une pression allant de 75 à 135 kPa. Comme

de plus ils offrent un temps de réponse plus rapide que les autres capteurs (2s). Les capteurs MOS ont cependant comme inconvénient un temps de restitution plus long (10s).

Tableau 2 Résumé des données de performance pour chaque type de capteur disponible [42].

Critères	Mos		EC		CAT		OPT		TCD	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Plage de température (°C)	-40	110	-40	55	-40	82	-15	50	-40	55
Plage de pression (kPa)	70	130	90	110	70	130	75	175	80	120
Plage d'humidité (%RH)	5	95	10	95	0	100	0	95	0	99
Plage de mesure (ppm)	200	44,000	15	50,000	-	44.000	1000	100%	-	100%
Temps de réponse (t_{90s})	2		5		8		60		10	
Temps de restitution (t_{10s})	10		-		10		-		10	
Consommation d'énergie (mw)	675		2.25		256		1080		350	
Durée de vie (h)	87,600		26.28		43.8		44		43.800	

2.6.1 Étalonnage

L'étalonnage est l'ensemble des opérations qui établissent le rapport entre les valeurs indiquées par le capteur et les valeurs connues correspondantes d'une mesurande [43]. Une fonction linéaire de l'étalonnage est préférable à une fonction non linéaire de calibrage parce que seulement trois des points de l'étalonnage recommandés sont exigés, voir la Figure 40. La linéarisation peut être réalisée en exécutant un procédé de transformation sur les données du signal, mais ceci peut avoir comme conséquence une contribution additionnelle d'incertitude. La Figure 40 montre les courbes d'étalonnage optimisées résultant de plusieurs mesures pour trois capteurs d'hydrogène de différents

types à la plage de concentration 0.1-1% H₂. Une réponse non linéaire est évidente dans le cas du semi-conducteur et les capteurs électrochimiques, avec l'augmentation de la concentration en hydrogène une gamme de saturation sera atteinte, qui résultent non seulement en sensibilité inférieure, mais également en conséquence une incertitude plus élevée dans la détection d'hydrogène.

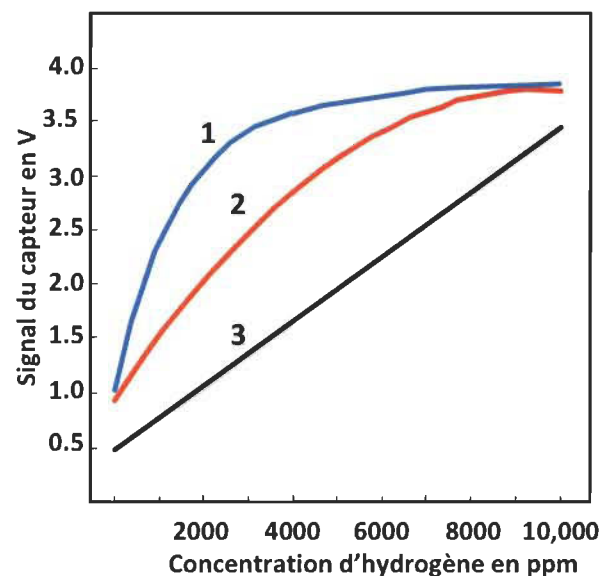


Figure 40 Courbe d'étalonnage pour trois capteurs d'hydrogène différents au-dessus de la plage de concentration 0.1-1 % - (1) capteur semi-conducteur (2) capteur électrochimique (3) capteur catalytique de combustion [24].

2.7 Conclusion

Dans cette partie, nous allons étudier en détail la structure et le comportement électrique du dispositif MOS, nous nous focalisons sur la capacité MOS parce que c'est le dispositif utilisé dans nos tests pour la détection du gaz d'hydrogène. Une introduction de la mesure de la capacité en fonction de la tension appliquée aux bornes du dispositif MOS est détaillée pour comprendre la courbe C-V caractérisant ce type de dispositifs. Comme

on a introduit le dispositif RF (antenne), ces caractéristiques et le choix du type d'antenne à utiliser pour établir la communication entre le lecteur et l'étiquette.

Chapitre 3 - Conception d'une étiquette RF sans fil

3.1 Introduction

La distance de lecture des étiquettes sans fil est une distance dans la majorité des cas de 1m à 10 m, voir Tableau 3. La bande de fréquence exploitée pour la réalisation de ce projet est la bande ISM 902 – 928 MHz, qui est d'une largeur de 20 MHz. Le contexte dans lequel l'étiquette sera exploitée joue un rôle majeur dans le bon fonctionnement du transpondeur, puisque l'étiquette sera intégré dans un environnement métallique (ou qui contient du métal) telles que les voitures ou les piles à combustible. La communication avec les étiquettes risque d'être interrompue par l'environnement hostile, pour cela la fabrication du transpondeur doit tenir en compte de l'environnement, soit dans le choix du matériau ou dans la technique de communication avec le lecteur. Ces étiquettes peuvent être classifiées en deux catégories principales, les étiquettes actives et les étiquettes passives.

La conception de l'étiquette RF sans fil utilisée pour détecter l'hydrogène va se faire en deux temps. D'abord, il faut concevoir l'élément sensible à l'hydrogène, qui est dans notre étude une capacité MOS. La structure en sandwich de la capacité détermine les grandes lignes à prendre en considération pour concevoir la structure du capteur. Une étude détaillée de l'effet de chaque couche est faite, afin de déterminer la meilleure configuration quand peut adopter pour la réalisation du capteur. Nous allons aussi

introduire une mesure de la tension - capacité (C-V) et de la courbe C-V, qui sont très utiles pour illustrer les caractéristiques de la capacité MOS.

Tableau 3 Les principales performances et spécificités des différentes fréquences utilisées en RFID [44].

Caractéristiques/ Fréquence	<135 kHz	13.56 MHz	860 / 930 MHz	2,45 GHz
Type de fréquences	Basse	Haute	Bandes UHF	Hyper
Technologie d'antenne	Bobine à air ou sur ferrite	Boucle imprimée Perforée Gravée	Boucle imprimée Perforée Gravée	Antenne imprimée gravée
Distance de lecture et écriture	>1m	Europe / France : 1m US>0,8m	Europe / France : pour le moment par utilisable fréquence GSM, Télé com. US> 1m à 10m	France <0,1m (en télé alimentée) (>1m avec dérogation) US>1m
Vitesse de transfert de données	<10 kbit/s	>100 kbit/s	>100 kbit/s	>200 kbit/s
Influence métal	Perturbation * (Espace>50mm = 90 % Pref)	Perturbation * (Espace>50mm = 90 % Pref)	Atténuation ** (Espace>10mm = 100 % Pref)	Atténuation ** (Espace 5 à 7 mm = 100% Pref)
Influence de l'eau	Aucune ***	Atténuation **	Atténuation **	Perturbation *
Influence de corps humain	Aucune ***	Atténuation **	Atténuation **	Perturbation *

(* Mesures indicatives réalisées par ID system)

Performances : * : Médiocres ** : Bonnes *** : Excellentes

Après la simulation de la capacité MOS, la conception de la partie RF de l'étiquette est l'étape à réaliser. Le choix de la fréquence de fonctionnement de l'étiquette est défini par l'antenne dipôle micro-ruban. Les matériaux, la géométrie sont les paramètres à

prendre en considération pour déterminer la bande de fréquences de fonctionnements de l'antenne. La fabrication de l'antenne, la connexion de celle-ci avec le capteur sont l'étape à accomplir pour fabriquer l'étiquette RF. Une adaptation entre le capteur et l'antenne doit se faire, dans le but d'optimiser la puissance transmise de l'étiquette vers le lecteur. Le logiciel de simulation RF Advnaced Design system d'Aglient est utilisé pour la conception de l'antenne, et pour avoir une idée des valeurs de la capacité MOS à prendre en considération, pour que l'étiquette fonctionne dans la plage de fréquences désirer.

3.2 Simulation de la réponse du capteur MOS capacitif

Le tracé de la variation de la capacité du capteur MOS en silicium de type p en fonction de la tension appliquée est obtenu en utilisant le logiciel de simulation nano Hub (<http://nanohub.org>), à une fréquence de 1 MHz. La fonction de travail de la couche sensible est influencée par la présence du gaz d'hydrogène, car elle varie de 5.12 ev [45] sans la présence du gaz d'hydrogène à 4.76 ev [46] dans la présence du gaz. Tableau 4 montre les différents paramètres utilisés pour la réalisation de cette simulation.

Comme approche, nous avons effectué les simulations en fonction de plusieurs critères physiques du capteur MOS pour choisir le bon substrat pour nos tests expérimentaux.

Comme il a été décrit précédemment, la tension de la bande-plate (*Flat Band*) dépend de la fonction de travail du silicium et de celle de la couche de métal déposé sur le SiO₂. Puisque notre objectif est de rendre notre dispositif sensible l'hydrogène, le dépôt d'une couche de palladium sur la couche de l'oxyde de silicium est primordial.

Tableau 4 Paramètres de simulation du capteur MOS sur nanohub

Paramètres	Valeurs
Épaisseur de la couche SiO_2	0.05 μm
Épaisseur de la couche Si	500 μm
Densité de dopage	14e+15/cm ³
Constante diélectrique du SiO_2	3.9
Température	300 K
Fréquence pour l'analyse AC	1MHz
Fonction de travail	variable
Résistivité	3, 482 $\Omega\text{-cm}$
Haute fréquence pour l'analyse AC	1MHz
Basse fréquence pour l'analyse AC	1Hz

3.2.1 Effet de l'épaisseur du substrat et de la couche d'oxyde

La fonction de travail de ce métal change de 5.12 à 4.75 ev, La Figure 41 montre la variation de la capacité en fonction de la tension, mais pour des valeurs différentes d'épaisseurs du substrat, avec une fonction de travail de grille égal à 4.76 ev, l'épaisseur de la couche d'oxyde vaut 50 μm . Comme on peut le voir l'épaisseur du substrat n'influence pas beaucoup la valeur de la capacité, car pour les différentes épaisseurs, la capacité prend les mêmes valeurs, pour cela on a choisi le substrat de silicium standard 500 μm d'épaisseur.

On a effectué la même démarche pour choisir l'épaisseur de la couche d'oxyde, avec un substrat d'épaisseur égal à 500 μm , on garde les mêmes paramètres indiqués dans le Tableau 4. Comme on peut le voir sur la Figure 42, l'augmentation de l'épaisseur de la

couche d'oxyde augmente la valeur de la capacité dans la plage de la tension 1 à 3 V, la courbe devient de plus en plus plate, elle se décale en haut d'une épaisseur à une autre. Pour cela l'épaisseur la plus souvent utilisée dans les tests est de 0.05 μm .

Alors le choix du semi-conducteur et l'épaisseur de la couche d'oxyde ont été sélectionnés avec les valeurs indiquées dans le Tableau 4.

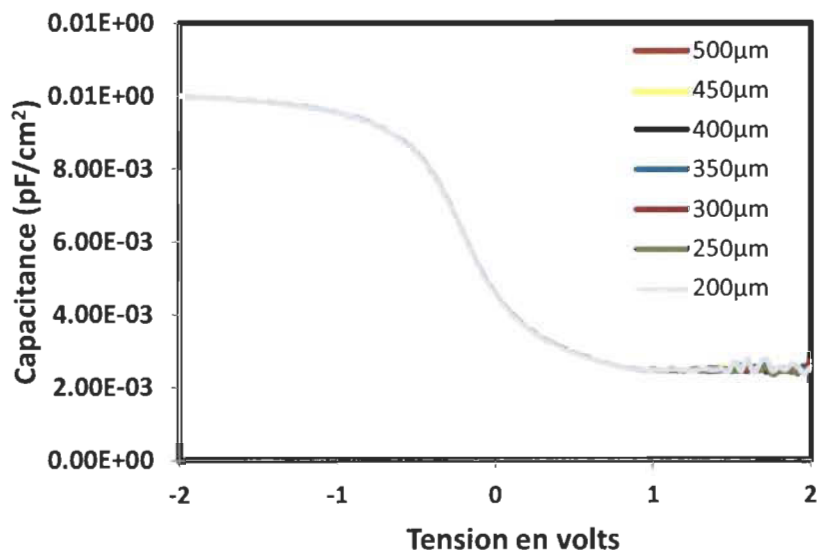


Figure 41 Mesure de la capacité vs la tension avec comme variable l'épaisseur de substrat.

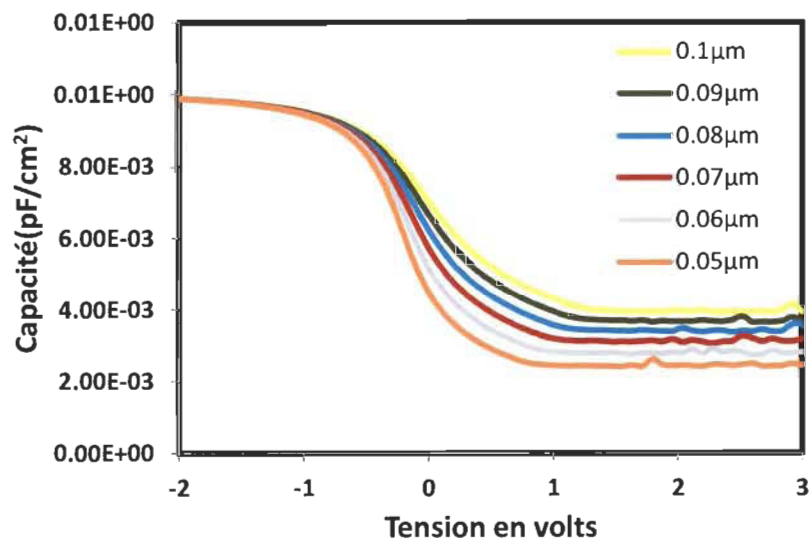


Figure 42 Mesure de la capacitance vs la tension avec comme variable l'épaisseur de la couche d'oxyde de silicium.

3.2.2 Calcul de l'aire de la couche sensible

Pour fonctionner sur différente fréquence, l'étiquette se base sur les différentes valeurs de la capacité MOS, la valeur de la capacité dépend aussi de l'aire de la couche sensible exposée à l'hydrogène. Figure 43 montre que plus l'aire est petite plus la courbe C-V devienne plate, pour cela on a tendance à choisir une plus grande aire de la couche sensible. Pour le calcul de ces valeurs, les simulations ont été effectuées sur le logiciel de simulation MOSCapacitor de *Nanohub* ([www.http://nanohub.org/](http://nanohub.org/)). Les aires qu'on peut utiliser pour la fabrication des capacités sont 0.7 mm x 0.7 mm à 1 mm x 1 mm et plus.

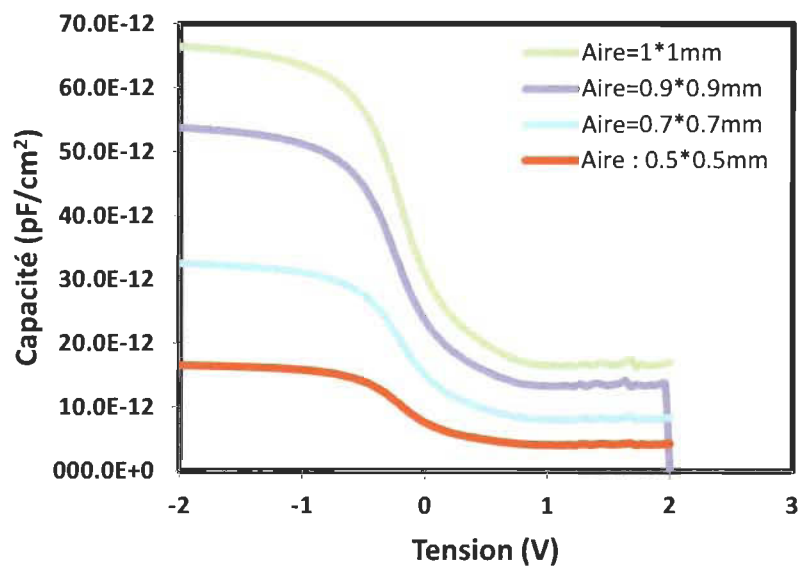


Figure 43 Calcule de l'aire de la valeur de la capacité en fonction de l'aire de la couche sensible

3.2.3 Simulation de la capacité MOS

Figure 44 montre le résultat de simulation de la capacité MOS. Comme on peut le voir, la courbe de la capacité MOS se décale vers la gauche lorsque la fonction du travail du palladium diminue en fonction de la concentration du gaz d'hydrogène.

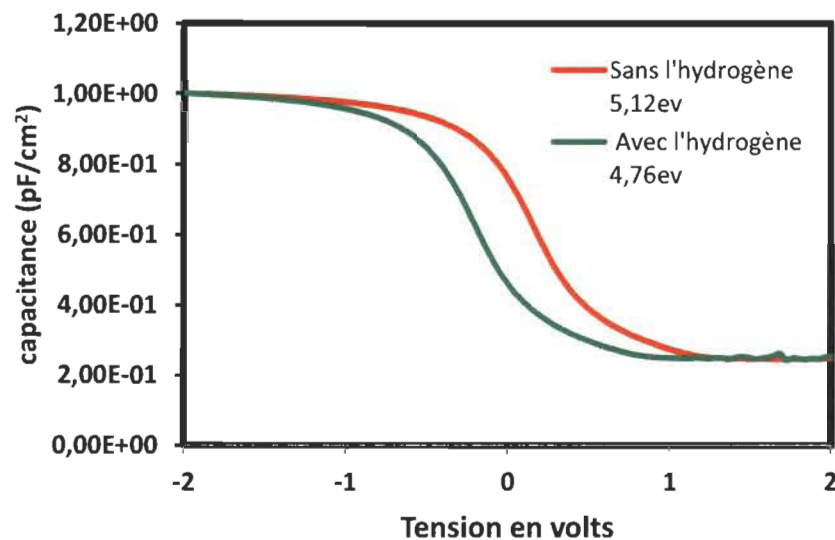


Figure 44 Caractéristique C-V du capteur MOS proposé de type p

3.3 Conception de l'antenne dipôle micro ruban

Pour transférer l'information collectée de la mesurande d'une manière sans fil, l'ajout d'une antenne au capteur est nécessaire voir la Figure 45, elle sert aussi à alimenter le capteur sans fil via le principe de télé alimentation en se basant sur les ondes électromagnétiques envoyées par le lecteur, pour cela son impédance doit être choisie afin d'assurer un transfert maximal de la puissance envoyée par l'élément sensible.

Les influences de l'environnement (variation de la mesurande) seront utilisées pour faire modifier la fréquence de résonance de l'étiquette, la valeur de la capacité change en fonction de la variation de la concentration du gaz d'hydrogène dans le milieu.

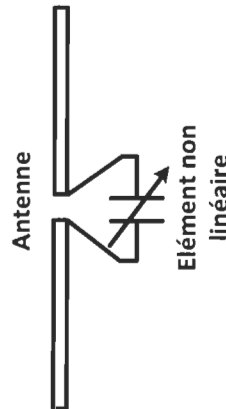


Figure 45 Capteur passif non linéaire

Ceci peut être réalisé par l'intermédiaire d'impédance dépendant de la fréquence où la mesurée affecte une capacité ou une inductance.

3.3.1 Conception de l'antenne UHF

Dans une perspective d'industrialisation, la conception de l'antenne de l'étiquette passe par plusieurs étapes, la méthodologie que nous présentons passe par les étapes décrites dans la Figure 46. Dans un premier temps, la conception de l'antenne UHF nécessite la détermination des caractéristiques de l'antenne en fonction de l'application visée. Vient ensuite la collecte d'information sur les matériaux utilisés dans la fabrication de l'antenne et sur l'environnement, car en fonction de de ce dernier le choix des matériaux est effectué. Comme prochaine étape, le choix du type d'antenne et son impédance doit être fait, pour évaluer l'impédance de l'étiquette connectée à l'antenne. Ensuite, la conception de l'antenne sur le logiciel de simulation RF est nécessaire, pour

optimiser les performances de l'antenne. Puis la construction de prototypes, et la détermination des équipements nécessaires pour le test de l'antenne sont l'une des étapes les plus importantes dans ce processus, car durant cette phase nous évaluons les performances de l'antenne fabriquée. Si les résultats des tests expérimentaux coïncident avec ceux obtenus durant l'étape de simulation, on va dire que notre dispositif répond aux besoins et on passe alors au stade de fabrication du dispositif, sinon, nous devons revoir le choix de notre antenne et refaire les étapes précédentes.

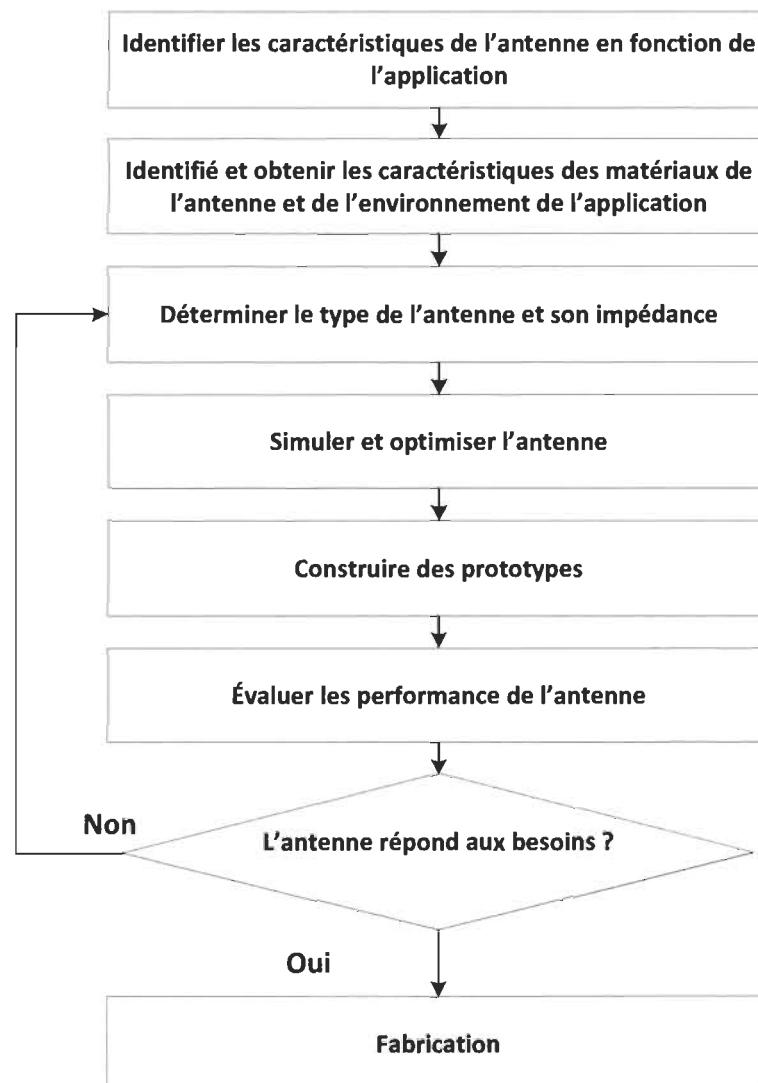


Figure 46 Digramme de conception d'une antenne

3.3.2 *Identification des propriétés de l'antenne en fonction de l'application visée*

Avant de commencer la conception de l'antenne, il faut déterminer ses propriétés en fonction de l'application :

Bande de fréquence : la bande de fréquence utilisée dans les étiquettes dépend de la zone géographique et du pays dans laquelle l'étiquette sera utilisée, ainsi les étiquettes sont différentes d'un pays à l'autre ou d'une région à l'autre.

Rayonnement : le rayonnement de l'antenne détermine la localisation de l'étiquette en fonction du lecteur. Une antenne directive nécessite une orientation bien définie pour qu'elle puisse communiquer avec le lecteur alors que le champ d'une antenne omnidirectionnelle se propage presque dans toutes les directions.

Dimensions de l'antenne : les dimensions de l'antenne vont déterminer la taille de l'étiquette (capteur). L'application visée joue un rôle important dans la détermination des dimensions de l'antenne. La taille de l'étiquette finale (antenne + capteur) est à peu près la taille d'un bouchon ou d'une pièce d'argent.

Coût : le coût de fabrication de l'antenne RFID dépend du matériau utilisé dans la fabrication de l'antenne.

Distance de lecture : le type d'antenne et les régulations (les normes) déterminent la distance de lecture de l'étiquette. Cette distance est en fonction de la taille de l'antenne. Plus l'antenne est petite, plus la surface radar est petite, plus la distance de lecture est limitée.

Objet à identifier : la connaissance de la nature de l'objet à identifier est très importante, car il peut s'agir du métal ou du carton rempli par une matière quelconque.

L'objet à identifier peut influencer les performances de l'antenne (son champ de rayonnement, la directivité, ainsi que le gain). Pour cela, il faut adapter l'antenne en fonction de cet objet.

3.3.3 Effet du substrat sur les performances de l'étiquette

La Figure 47 montre une antenne micro ruban de forme arbitraire, le substrat utilisé et le stratifié. Une antenne planaire est un résonateur, ainsi une de ses dimensions doit être environ $\lambda_g/2$, où λ_g est une longueur d'onde guidée prenant en compte l'environnement de l'antenne imprimée. Il est évident que les propriétés du substrat, à savoir, sa constante diélectrique, ϵ_r et sa taille jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement de l'antenne planaire.

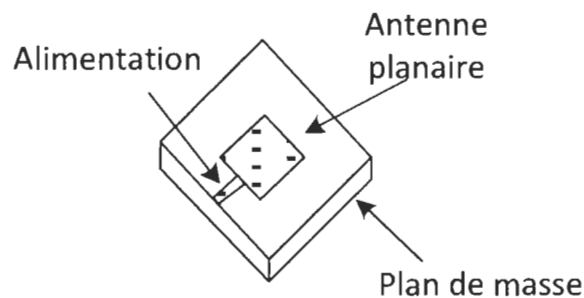


Figure 47 Schéma de principe de l'antenne patch de forme arbitraire.

La Figure 49 Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur du substrat .**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre la variation de la largeur de bande pour diverses constantes diélectriques en fonction de l'épaisseur électrique du stratifié. Comme en peut le voir à partir de ce tracé, plus le matériau est épais, plus la bande passante est grande.

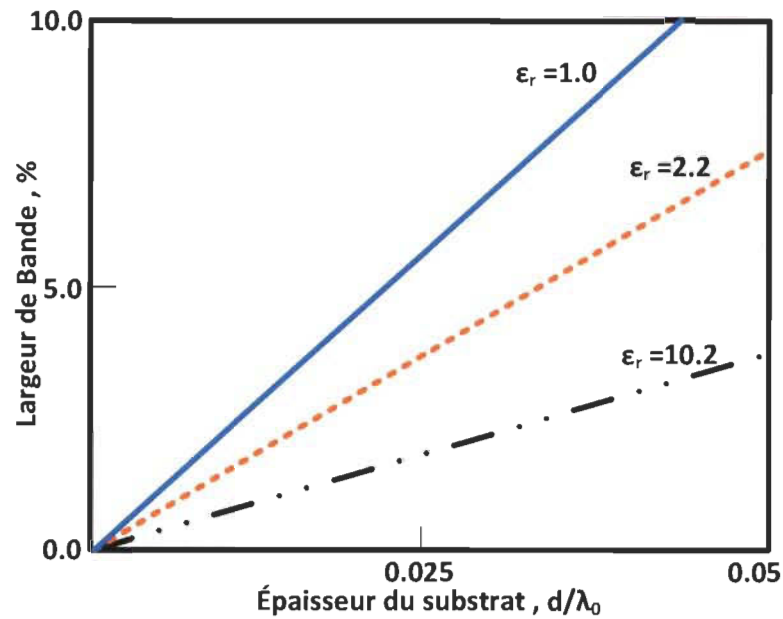


Figure 48 Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur du substrat .

La Figure 48 représente la variation de la directivité de l'antenne planaire pour des constantes diélectriques différentes en fonction de l'épaisseur du substrat. On observe que l'antenne planaire, montée sur le matériau à faible constante diélectrique, est physiquement plus grande qu'une antenne montée sur un diélectrique stratifié de haute constante diélectrique. La directivité augmente légèrement à mesure que l'épaisseur augmente en raison de l'augmentation du volume de l'antenne [47].

3.3.1 Propriété du substrat de l'antenne

L'antenne micro ruban est dessinée en utilisant le substrat diélectrique RO4003C d'une permittivité relative 3.55, et une épaisseur 1.524 mm. L'épaisseur de la couche de cuivre sur le substrat est de 35 μm . La Figure 49, montre que la constante diélectrique de ce type de matériaux reste constante sur toute la plage de fréquence (0 à 10 GHz) par rapport aux autres types substrat.

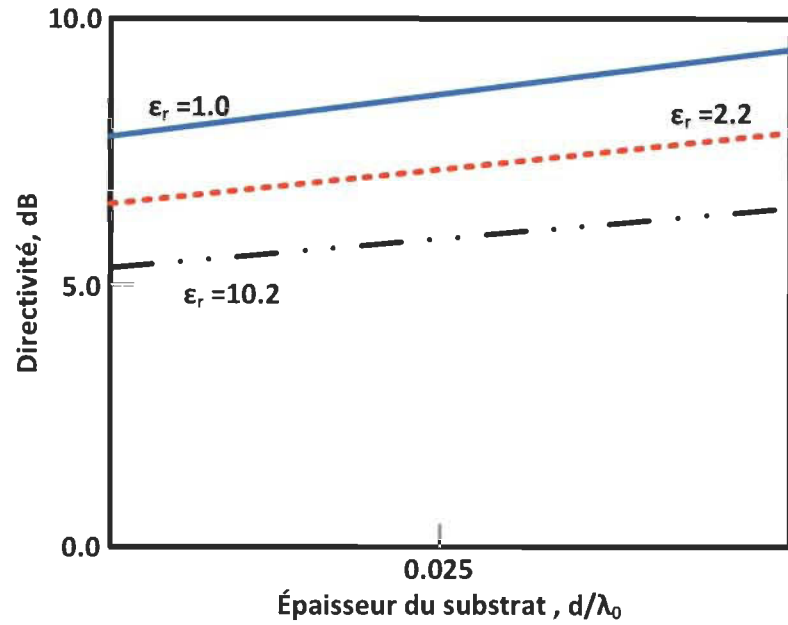


Figure 48 Variation de la directivité en fonction de l'épaisseur du substrat [47].

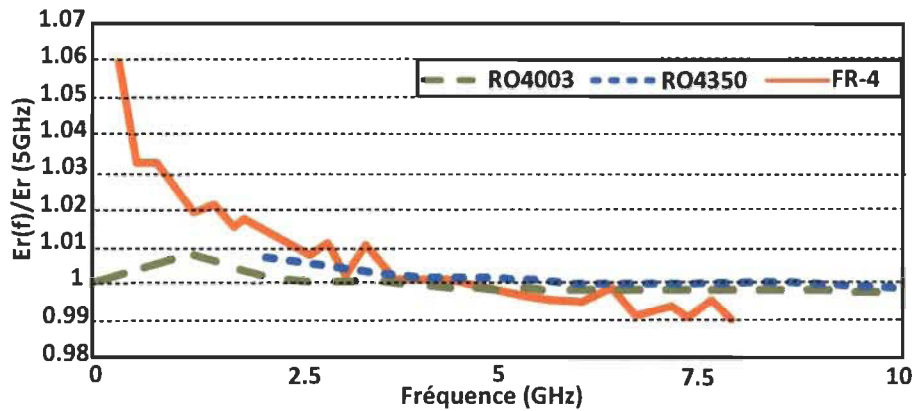


Figure 49 Constante diélectrique des matériaux de la série RO4000 vs la fréquence [48].

3.3.2 Géométrie de l'antenne dipôle microruban

Les paramètres des simulations de l'antenne sont basés sur le logiciel de simulation radio fréquence *Advanced Design System*. Les dimensions de l'antenne sont présentées dans la Figure 50. L'alimentation de l'antenne est assurée par la ligne d'impédance 50

ohms. La face arrière du substrat ne contient aucune couche métallique, et cela pour assurer une antenne omnidirectionnelle qui est le facteur le plus important. Ce facteur assure un comportement propre de l'antenne dans n'importe quelle direction. L'antenne est constituée de deux branches en parallèle séparées par un intervalle. Une branche sert à la diffusion de l'information et c'est la branche connectée à la masse ou considérée comme étant la masse, et l'autre sert à l'alimentation de l'antenne.

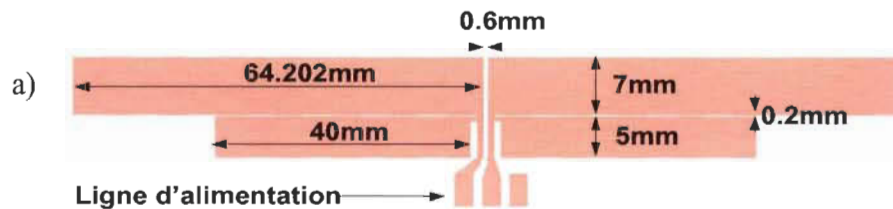


Figure 50 Géométrie de l'antenne dipôle, dimension de l'antenne dipôle.

Comme on peut le voir sur la Figure 51, les pertes en retour à 906.3 MHz sont de 17dB, ce qui signifie que l'antenne absorbe une très grande quantité d'énergie reçue.

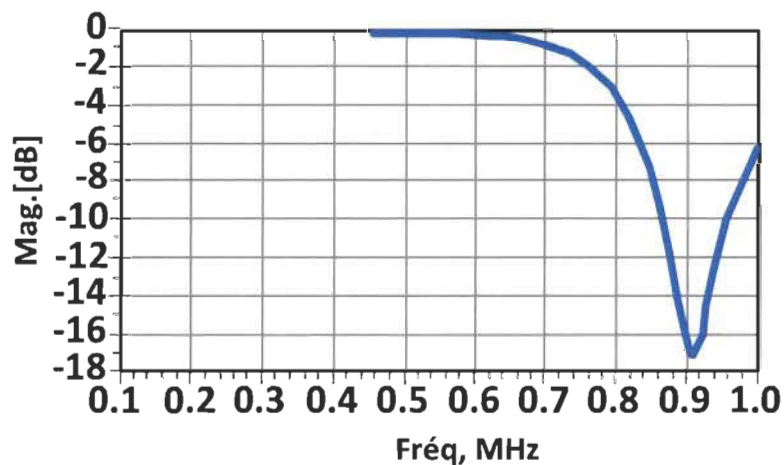


Figure 51 Affaiblissement de réflexion de l'antenne dipôle micro ruban

Les résultats de simulations de l'antenne dipôle sont résumés dans le Tableau 5, le gain absolu de l'antenne à 925MHz est 2.08dB avec une efficacité autour de 95.80%.

Figure 52, montre le diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle à 925Mhz.

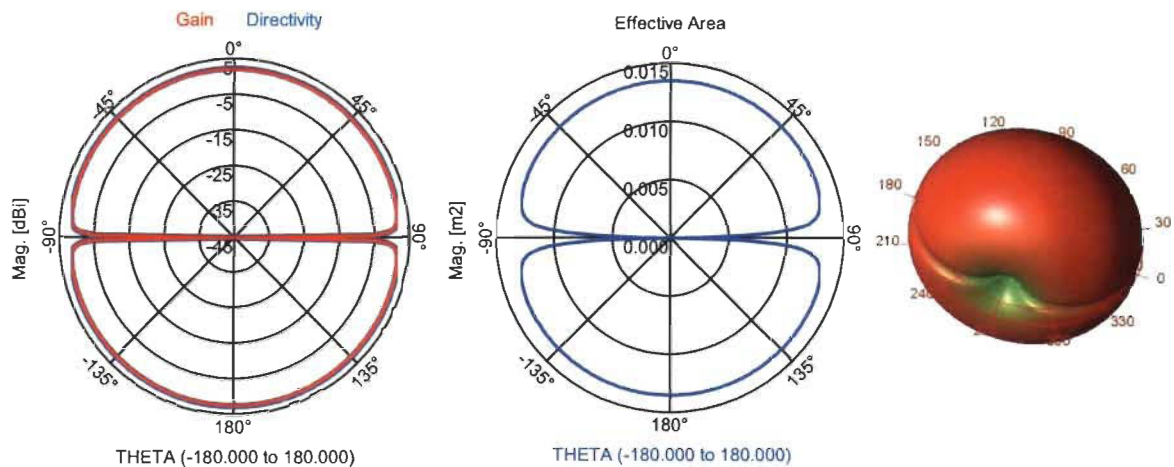


Figure 52 Diagramme de rayonnement de l'antenne dipôle @ 920.9MHz, à gauche le diagramme du gain et la directivité, au centre le diagramme de la zone de couverture effective.

Tableau 5 Sommaire des performances de l'antenne dipôle micro ruban à 906.9 MHz

Paramètres de l'antenne	@903.9MHZ
Gain (dB)	2.08
Directivité [dB]	2.26
Efficacité [%]	95.880
Puissance de rayonnement (Watt)	0.0024785

3.4 Conception de l'étiquette RF

Pour concevoir une étiquette RF, plusieurs étapes doivent être respectées, voir là Figure 53. La première étape consiste à identifier les caractéristiques de l'étiquette, par

exemple dans quelle bande de fréquences notre dispositif fonctionne, dans quel environnement sera-t-il intégré, ainsi que d'autres critères à préciser.

L'étape qui suit est de déterminer les différentes parties de notre capteur, c'est-à-dire les principaux blocs constituant la puce. Dans la méthodologie, la simulation et l'optimisation de la partie sensible du gaz d'hydrogène sont le 1^{er} bloc à identifier, car c'est en fonction de ce dernier que les autres blocs seront déterminés.

La simulation de l'antenne est nécessaire, durant cette phase plusieurs critères seront mis au point, comme la grosseur de l'antenne (ses dimensions), la portée, la forme de l'antenne et enfin son intégrité dans l'environnement de l'application.

Comme les deux grandes parties de l'étiquette passive ont été identifiées, un réseau d'adaptation entre les deux unités est nécessaire afin de minimiser les pertes et maximiser la puissance de communication avec le lecteur. Puis une simulation de l'étiquette est nécessaire avant de passer à la fabrication du dispositif final. Dans le stade où l'on arrive à la fabrication de l'étiquette, le dispositif doit passer par des tests, s'il répond au besoin on passe à la fabrication à grande échelle, sinon, on revient à l'étape d'optimisation.

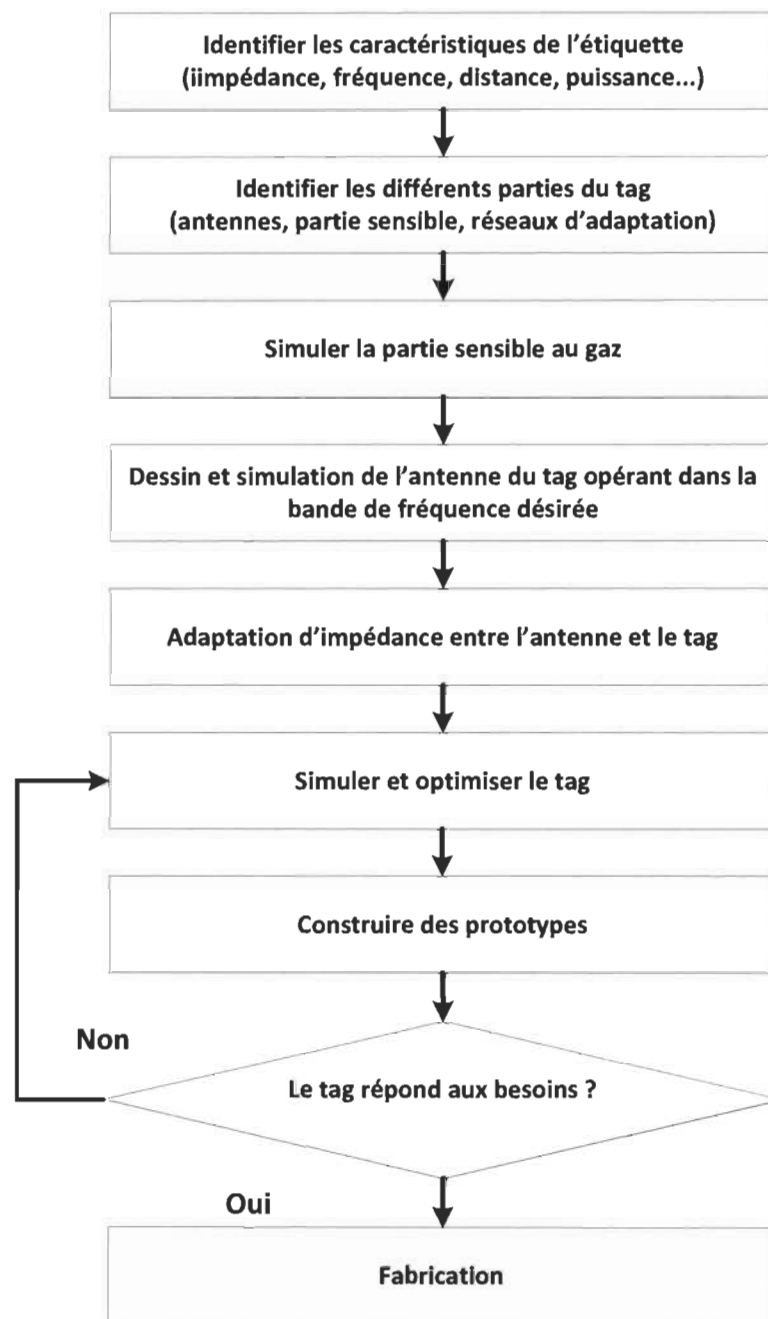


Figure 53 Méthodologie de conception de l'étiquette RF

Pour avoir une idée sur les différentes valeurs de la capacité MOS sensible à l'hydrogène qui seront connectées avec l'antenne. Figure 54 montre le schéma électrique de l'étiquette RF, l'annexe B montre le circuit électrique utilisé dans la production du circuit RF proposé. Pour que l'étiquette soit très bien harmonisée avec l'antenne micro

ruban, nous avons effectué une adaptation d'impédance, sous le logiciel *Advanced Design System*, ainsi les lignes liantes les différents composants constituant l'étiquette ont été conçues de manière à ce que les pertes tendent vers zéro.

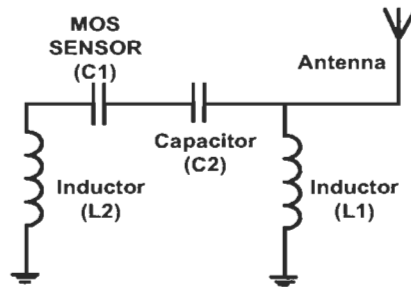


Figure 54 Le digramme circuit de l'étiquette sans fil

L'affaiblissement de réflexion du modèle de l'étiquette RF est montré sur la Figure 55, nous constatons que le étiquette résonne à 900.1MHz des pertes en retours sont inférieures à -40dB.



Figure 55 Affaiblissement de réflexion du prototype de l'étiquette RF

La courbe de la Figure 56, nous montrent les différentes fréquences de résonances des différents étiquettes constituant le réseau de capteurs simulé. Tableau 6 résume les

différents paramètres des composants constituant l'étiquette. L'aire de la capacité est calculée en utilisant l'équation 3-1 suivante :

$$S = \frac{ec}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (3-2)$$

Avec S , e et ϵ_0 représentent respectivement la surface de la plus petite des armatures en m^2 , l'épaisseur du diélectrique en mètre, la permittivité du vide et ϵ_r représente la permittivité ou constante diélectrique de l'isolant et enfin c la valeur de la capacité.

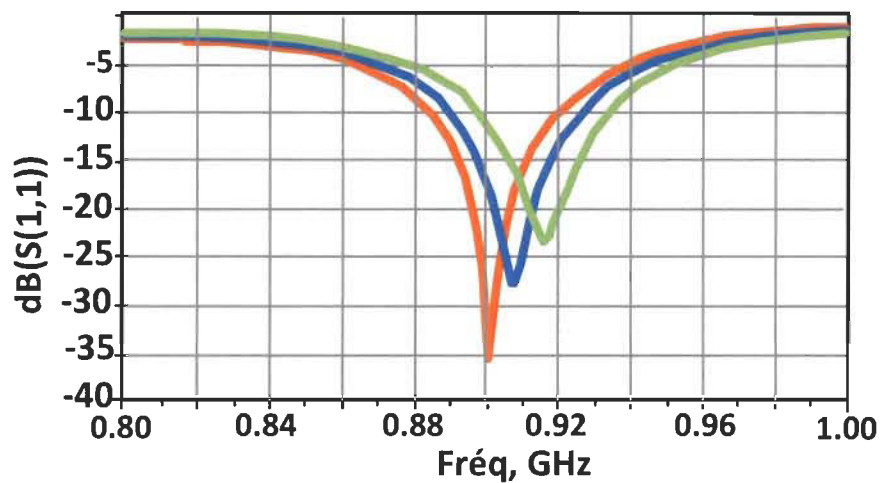


Figure 56 Affaiblissement de réflexion de l'étiquette RF

Tableau 6 Les différentes fréquences de résonance des différents étiquettes sans fil.

Quantité	Valeurs	Freq, (MHz)	Aire de la couche sensible
Capacité MOS C1 (pF)	27	917	301µmx301µm
	22	923	243.6µmx243.6µm
	33	913	210.97µmx210.97µm
Capacité C2 (pF)	3.3		
Inductance L2 (nH)	2.7		
Inductance L1 (nH)	2.2		

3.5 Conclusion

Dans cette partie, nous allons étudier en détail la structure et le comportement électrique du dispositif MOS, nous nous focalisons sur la capacité MOS parce que c'est le dispositif utilisé dans nos tests pour la détection du gaz d'hydrogène. Une introduction de la mesure de la capacité en fonction de la tension appliquée aux bornes du dispositif MOS est détaillée pour comprendre la courbe C-V caractérisant ce type de dispositifs. Comme on a introduit le dispositif RF (antenne), ces caractéristiques et le choix du type d'antenne à utiliser pour établir la communication entre le lecteur et l'étiquette.

Chapitre 4 - Résultats expérimentaux

4.1 Fabrication du capteur MOS

L'oxyde gravant tamponné (BOE – Buffered Oxide Etch) est une solution chimique de gravure utilisée en micro fabrication. Cette solution est essentiellement utilisée pour graver des couches minces de dioxyde de silicium (SiO_2) ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Elle est composée d'un tampon, comme du fluorure d'ammonium (NH_4F), et d'acide fluorhydrique (HF). Le substrat de silicium est acheté avec des couches d'oxyde sur les deux faces, le Tableau 7 nous montre les différentes caractéristiques du substrat utilisé pour la fabrication du capteur.

Tableau 7 Caractéristiques du substrat utilisé dans la fabrication du capteur MOS

Type de substrat	Silicium
Diamètre	100 +/- 0.5 mm
Résistivité	<10 Ω
Spécification prime	Prime
Type / orientation	P/Boron - 100
Épaisseur	500-550 μm
Épaisseur couche d'oxyde	500 Å \pm thermal oxide on both side
Fournisseur	WRS MATERIALS (www.wrsmaterials.com)

Puisque les tranches achetées ont déjà de l'oxyde sur les deux côtés du substrat de silicium, nous devons supprimer le SiO_2 sur la face arrière de la tranche par le BHF. Pour cela nous allons utiliser le procédé indiqué dans la Figure 57 :

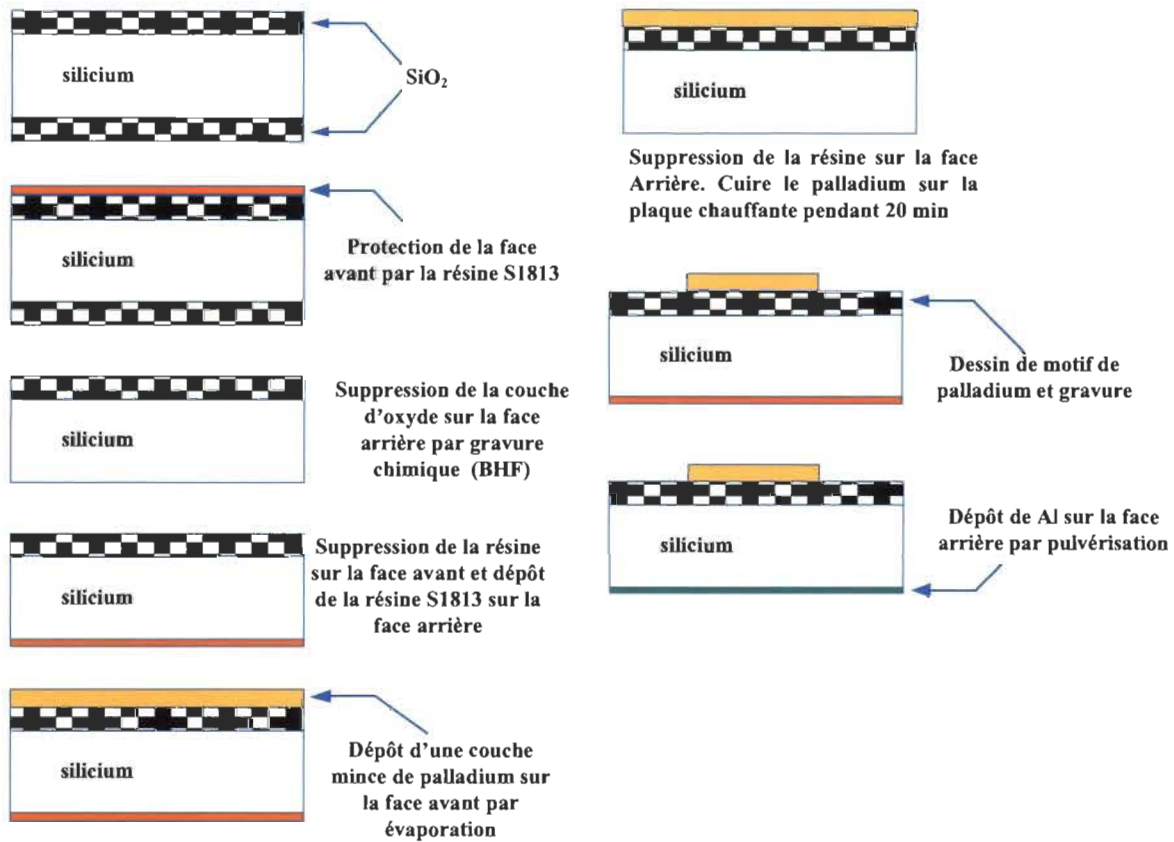


Figure 57 Procédé de fabrication du Capteur MOS

4.1.1 Suppression de la couche d'oxyde

D'abord nous devons protéger la face avant de la plaque de silicium par une couche protectrice, pour cela nous utiliserons la résine positive, S1813, cette résine est peu sensible au BHF. Le dépôt de la couche d'adhésion HMDS (hexaméthylidisilazane) avec

le Spin Coater, voir la Figure 58, la recette utilisée dans le laboratoire de l'INRS est la suivante :

- BK-115-1.LND (115°C pendant 3 min) cuisson de la couche d'adhésion pendant 3 min dans une température égale à 115 °C.

Après le dépôt de la couche d'adhésion (HMDS), on dépose la couche protectrice (la résine S1813) par enduction centrifuge. La recette utilisée pour le dépôt de cette substance chimique se fait en deux temps :

- PMA-2000S.LND : vitesse de rotation de la tournette 2000rpm, l'épaisseur de la couche déposée 20000Å.
- BK-110-1.LND : cuisant de la résine pendant une minute dans une température de 110°C.



Figure 58 Spin-Coater SpinBall, fabricant SITE Services

Après la protection de la face avant du substrat, l'étape qui suit est la suppression de la couche d'oxyde de la face arrière du substrat. Pour cela l'équipement utilisé dans le laboratoire et le banc humide, voir la Figure 59.



Figure 59 Banc Humide

Cette phase se fait normalement en 3 étapes essentielles :

- Émerger le substrat dans le BHF pendant 1min, car ce produit chimique grave 100nm/min.
- Émerger par la suite le substrat dans l'eau, pour enlever le BHF qui reste collé dans le water.
- La phase finale est le séchage du substrat avec de l'azote

4.1.2 *Déposition du palladium*

Il y a deux méthodes pour déposer des couches de palladium. Les plus communs est le dépôt par pulvérisation et évaporation. Les couches de palladium peuvent être encore divisées en type deux : poreux ou non poreux. Il est ramené que la couche poreuse mince

de palladium déposé par pulvérisation montre une très grande sensibilité à l'ammoniac et aux autres gaz [49].

Dans ce travail, nous nous concentrons sur des capteurs d'hydrogène, ainsi l'évaporation a été choisie pour déposer des couches non poreuses de palladium voir la Figure 60.



Figure 60 Evaporateur E-beam AXXIS, Manufacturer: Kurt J. Sputter Lesker

Avant de faire le dépôt du palladium sur la face avant du substrat, nous devant protégé la face arrière par la résine S1813, en utilisant la même technique que nous avons utilisée dans la partie de suppression de la couche d'oxyde.

Après cela nous effectuons le dépôt de la couche mince du palladium, la durée de ce dépôt varie entre 30 et 35min selon la quantité et la disposition de l'échantillon dans le creuset, le Taux de dépôt est stable tout au long de la déposition. Tableau 8 nous montre les différents paramètres durant la phase de dépôt.

Pour que le palladium adhère très bien avec la couche d'oxyde, on doit le cuire sur la plaque chauffante à une température 200°C pendant vingt minutes.

Après plusieurs tests, on a constaté que le palladium ne tient pas sur la couche d'oxyde en utilisant un dépôt direct de la fine couche par évaporation. Le dépôt par pulvérisation reste la technique à essayer pour faire cette manipulation.

Tableau 8 Fiche technique du système de déposition E-Beam – Axxis

Caractéristiques du dépôt			
Recette # / Mode manuel : Man	Durée : 35min	Heure début : 16h30	Heure fin : 17h15
Substrat			
Type : Si 4 pouces	Nombre : 2	Rotation : yes	
Déposition			
Crucible # : 1	Composition : Pd		
Tension : 6.64 (V)	Courant : .06 (A)	Dial : .66	
Pression de base : 6.9exp-6		Pression de dépôt : 2.8exp-5	
Caractéristiques / Process			
Sigma Control Request: Palladium	Sigma Last message:@up;09cl	Sigma Process name: Palladium	Sigma Film name:06
Statut du crystal			
	Deposition. Rate A / sec	Deposition. Thickness (KA)	Xtale Q %
Sigma XL11	0.5	0.865	91
Sigma XL12	0.5	1.000	98

Le dépôt direct du palladium sur la couche d'oxyde n'est pas la bonne solution, car selon le test effectué, on a constaté que le métal ne tient pas sur la couche isolante. Pour cela, il faut explorer le dépôt direct en utilisant la pulvérisation. La partie qui suit, est une

description de différentes étapes utilisées pour réaliser le capteur d'hydrogène en se basant sur la technique d'évaporation.

4.1.3 Création des motifs du Palladium

Cette étape est la création de motifs d'électrodes de palladium. Figure 61 montre le masque complet des motifs dessinés avec le logiciel « Tanner ». Ce masque en chrome est fabriqué par « Fine Line Imaging ». Le masque contient plusieurs motifs d'électrodes d'aire et de formes différentes pour réduire le cout du masque. Les motifs sont organisés dans une série de quatre, c'est-à-dire que chaque rectangle de motifs déterminé par des lignes de coups constitue une série.

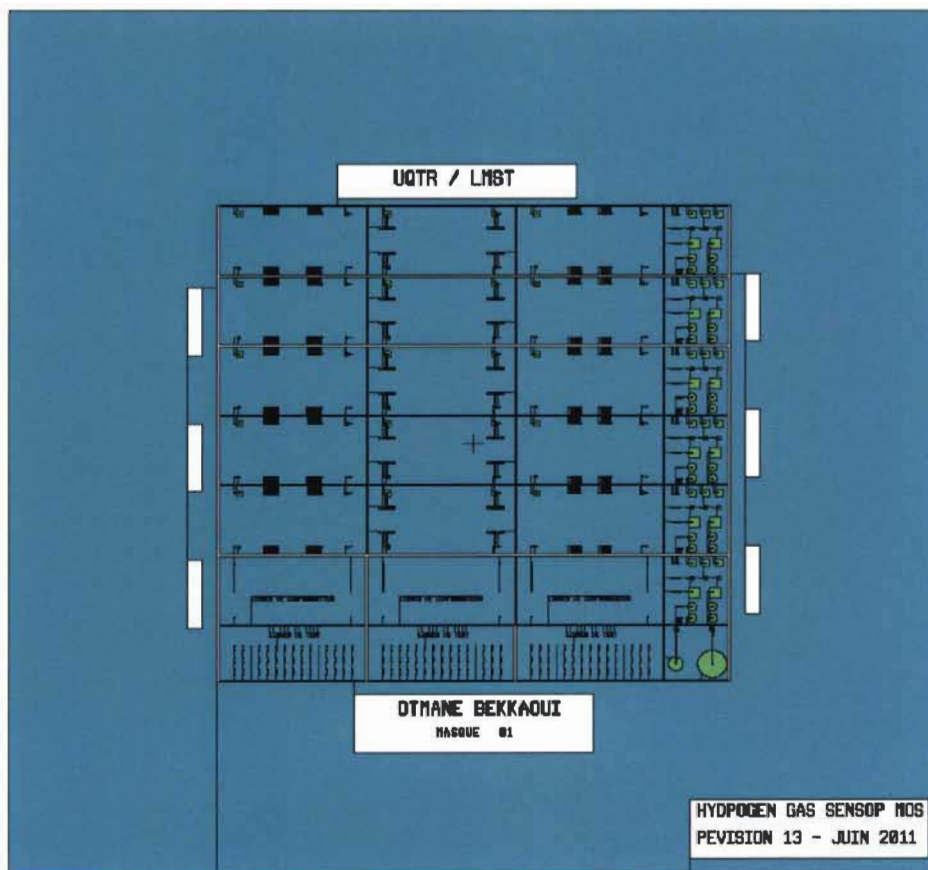


Figure 61 Vue globale du dessin de masque

Pour pouvoir superposer nos masques nous avons besoin d'une croix et d'un vernier, l'une bouge selon l'axe des x et l'autre selon l'axe des y, ces deux dessins sont essentiels pour aligner nos masques pour faire le dépôt ou la gravure dans les bons endroits.

Pour chaque masque il y a deux entités d'alignement, un vernier et une croix. le vernier et la croix des deux masques affichés ensemble. La croix se trouve dans les petits rectangles de cotés et le vernier se trouve dans les rectangles d'identification et de logos. Figure 62 et la Figure 63 montres une vue d'emplacement de ces deux dessins.

Pour faire un alignement exact, les croix doivent se situer sur le même niveau, sur les deux côtés. Dans notre masque, les coordonnées de la croix par rapport à chaque rectangle conteneur sont de $x = 1000\mu\text{m}$: $y = 2000\mu\text{m}$.

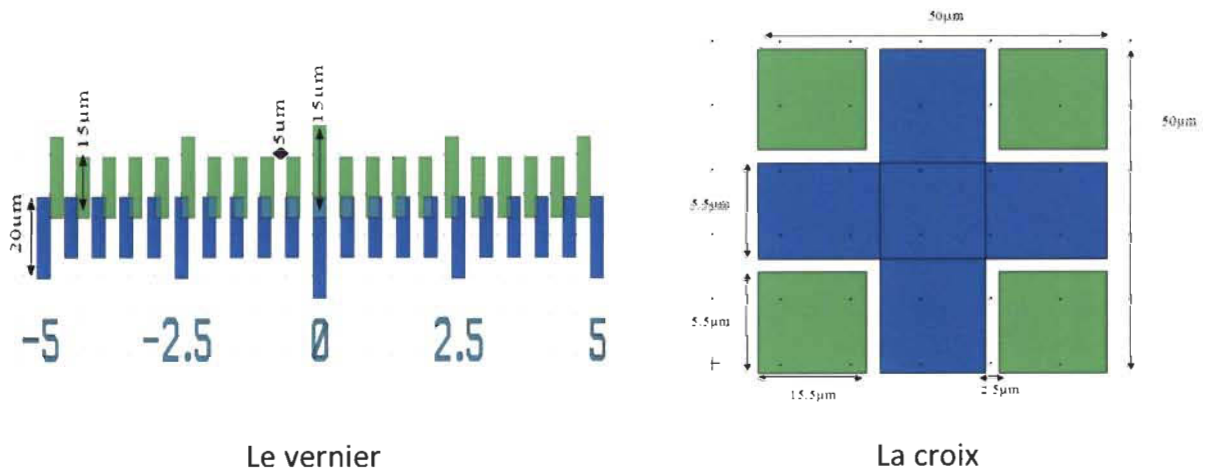


Figure 62 Dimensions du vernier et de la croix

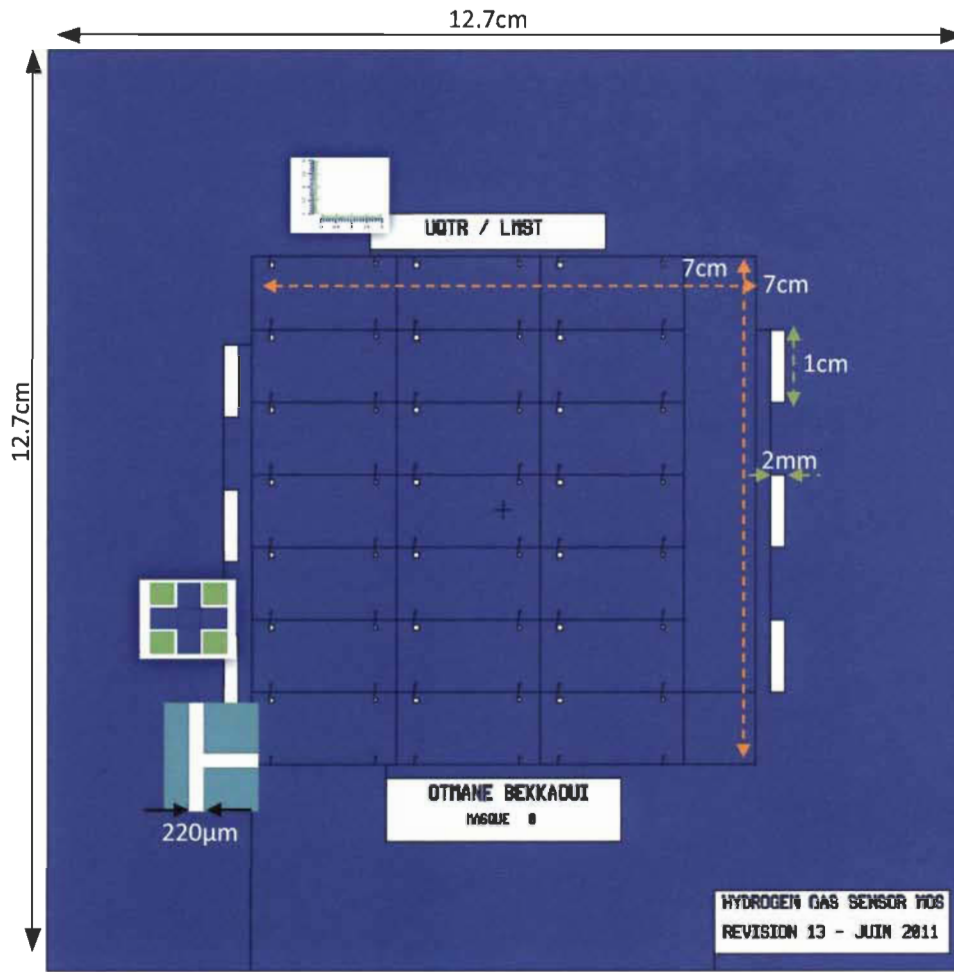


Figure 63 Dimension du dessin de masque, du vernier et de la croix.

4.1.4 Dessin de masque du capteur de gaz MOS

Notre capteur se compose de 4 couches, une couche d'aluminium sur la face arrière du substrat, une couche de silicium, une couche d'oxyde de silicium couvrant la face avant du substrat et enfin la couche de palladium. La couche sensible est la dernière couche déposée sur la couche d'oxyde dans des endroits précis. Alors dans nos masques, nous devons seulement tracer le motif qui nous permet de faire le dépôt de la couche

sensible sur la pile des couches pour former une capacité MOS et les pads de connexion de la capacité avec les dispositifs de test, voir la Figure 64.

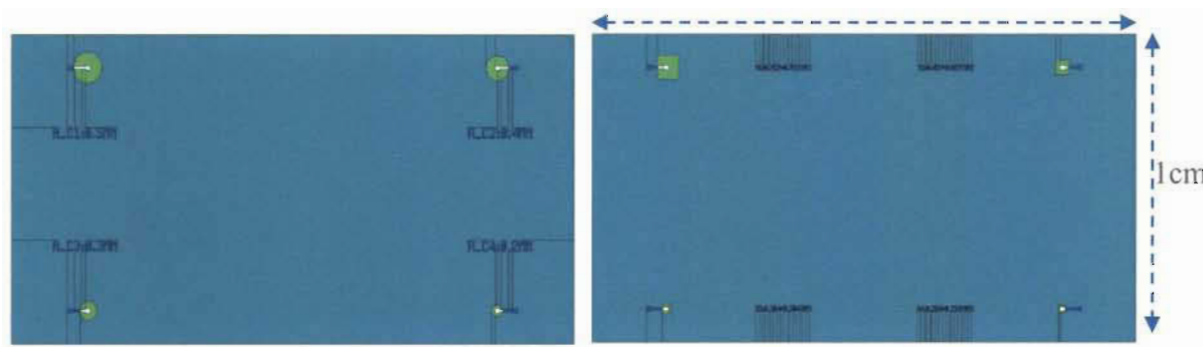


Figure 64 a) Les couches de métal sous la forme d'un carré, b) capacités sous la forme d'un cercle.

Les dimensions des pates des couches sensibles sont successivement : $0.762\mu\text{m} \times 0.762\text{mm}$, $0.457 \times 0.457\text{mm}$, $0.304 \times 0.304\mu\text{m}$ et $0.254 \times 0.254\mu\text{m}$ pour le cas des couches carrées, en ce qui concerne les couches sous la forme d'un cercle les rayons sont 0.5, 0.4, 0.3, 0.2mm.

Le dessin de masque est l'étape avant la fabrication. Il est essentiel de bien définir chaque masque ainsi que les dimensions de chaque ligne et pate, et dispositifs, avant de passer à la fabrication.

4.1.5 *Déposition de l'aluminium*

Après le dépôt du palladium sur la face avant du substrat, le dépôt d'une couche mince d'aluminium 100 nm, sur la face arrière du substrat, en utilisant la pulvérisation de la cible en aluminium. Le pulvérisateur utilisé est le pulvérisateur cathodique CMS-18 du Manufacturier Kurt J. Lesker, voir la Figure 65. Dans cette phase, on n'a pas besoin de protéger la face avant, car elle est protégée par la machine. La durée du dépôt est de 32 min. la pression de dépôt 3mTorr. Le taux de dépôt après 27 min est de 3.5\AA/s . Figure 66

montre le dépôt de l'aluminium avec la technique de pulvérisation sur la face arrière du substrat. Comme dans le cas de l'évaporation, on a établi un bilan de la période de dépôt durant la pulvérisation, voir Tableau 9.

4.1.1 Gravure du palladium

La gravure du palladium se fait par le produit chimique Palladium Etchants TFP de la société « TRANSENE COMPANY ». L'utilisation de ce produit se fait dans des récipients en verre, Pyrex ou en PVC. La température du Palladium Etchants TFP varie de 40 à -60°C avec un débit de gravure égale 110Å/Sec @ 50°C, dans notre cas 1000Å/10s. L'eau est utilisée pour le rinçage du water après l'utilisation du Palladium Etchants. Pour la protection de la face arrière, on peut utiliser la résine positive S1813 où la résine négative [50].



Figure 65 la Cible en aluminium (gauche), le système de pulvérisation CMS-18 (droite)



Figure 66 Aluminium sur la face arrière du substrat.

Tableau 9 Fiche technique du système de déposition par pulvérisation cathodique CMS-18

Projet : Projet UQTR20110720SDa		Date : 19 Août 2011	
Opérateur : Otmane			
Caractéristiques du dépôt			
Recette # Mode manuel : Man	Durée : 32 min	Heure début : 9h00	Heure fin : 12h00
Substrat			
Type : Silicium 4 pouces	Nombre : 2	Rotation : yes	
Température dépôt : RT °C	Rampe (max 10°C/min) : NA °C/min		
Cathode			
Source # : 3	Composition : Al	Kwhrs début : 0	
		Kwhrs fin : 4.1x10exp-2	
Puissance : 600 W	Rampe : 10 W/sec	Fwd Power : 250 W	Dc Bias : 336 V
Plasma			
Pression initiale : 2.8x10exp-7 Torr		Pression de dépôt : 3 mTorr	
Débit Ar/N ₂	Set point : 63 SCCM	Débit O ₂	Set point : SCCM
Actuel : 25-27 SCCM		Actuel : SCCM	
Durée Bias nettoyage : 10 min		Température Bias nettoyage : RT °C	
Puissance nettoyage : 600 W	DC Bias : 336V	Valve high Vac en position ouverte: Yes	
Puissance dépôt : 600 W		DC Bias : 336 V	
Micro Balance (Σ SQM – 242)			
Taux de dépôt : 3.4 Å/sec	Thik : KA°	Durée de vie : %	
Densité :	Tooling factor :	Z factor :	

4.2 Fabrication de l'étiquette RF

La fabrication de l'étiquette sans fil passe par deux étapes principales, d'abord, il faut concevoir l'antenne dipôle microruban, l'élément qui sert à transmettre l'information vers l'unité de traitement, puis nous devons concevoir l'étiquette, la partie responsable de la collecte d'information, qui sera connectée à l'antenne.

La mesure de l'impédance des étiquettes se fait via l'analyseur du réseau vectoriel, ce dernier a été calibré en utilisant une calibration SOL (Short, Open, Load), cette technique utilise une charge en court-circuit, une charge adaptée et enfin une charge ouverte. La calibration a été faite avec des charges standard calibrées.

4.2.1 Implémentation physique de l'antenne

La Figure 67 montre l'antenne dipôle fabriquée. La mesure de l'antenne est faite à travers le connecteur SMA.

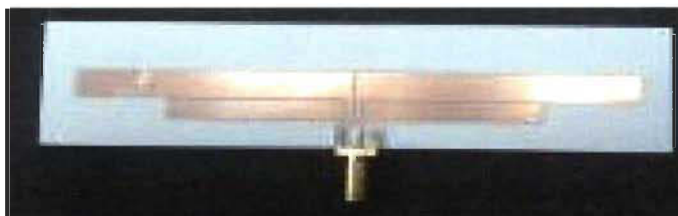


Figure 67 Fabrication de l'antenne micro ruban.

Le test de l'antenne dipôle est effectué via l'analyseur de réseau vectoriel, voir la Figure 68.



Figure 68 Montage de mesure de l'antenne.

Figure 69 montre que les résultats pratiques coïncident avec ceux des simulations, seulement il y a un léger décalage vers la droite de la courbe du résultat pratique, est celui-là est dû à l'environnement du test. L'antenne résonne à 925 MHz avec des pertes d'insertion égale à -18.26.

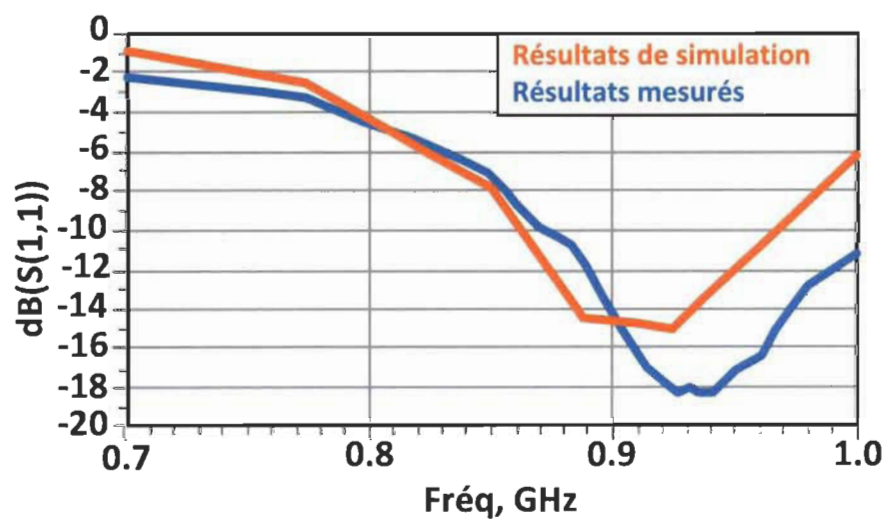


Figure 69 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations de l'antenne dipôle

4.2.2 Mesure de l'étiquette

Après la détermination des valeurs des différents composants constituant l'étiquette, on utilisant le logiciel *Advanced Design System* en génère la topologie des étiquettes RF, comme le montre la Figure 70.

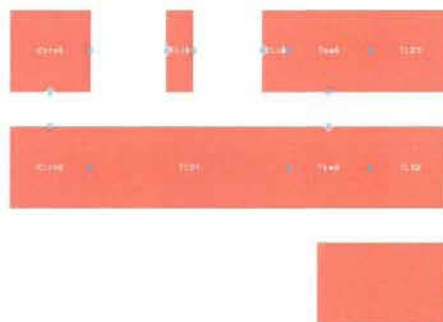


Figure 70 Dessin des lignes de connexion des éléments passifs du capteur fabriqué.

Les résultats expérimentaux de l'antenne ont été utilisés pour simuler les trois balises sans fil. La Figure 71 montre les différentes fréquences de résonance des différentes balises sans fil en utilisant l'antenne fabriquée.

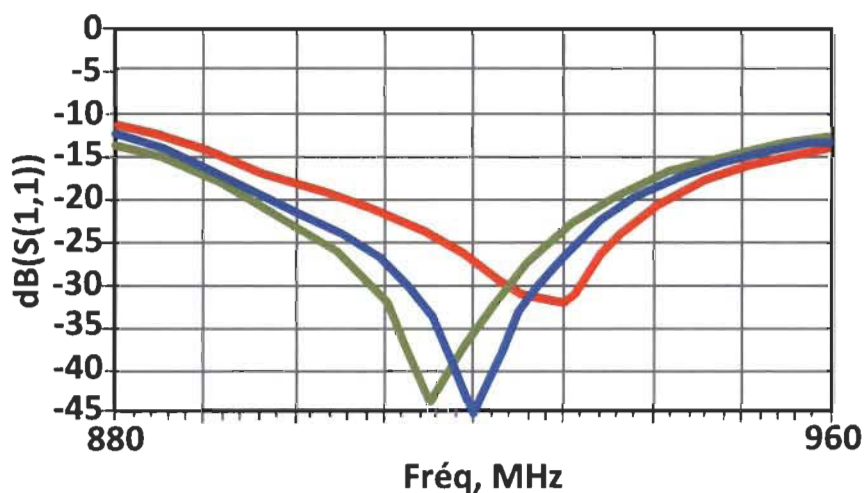


Figure 71 Les résultats de mesure des fréquences de résonance des différents capteurs sans fil.

Tableau 10 compare ces fréquences de résonance avec les résultats simulés. On constate que les capteurs sans fil résonnent dans la bande 902-928MHz.

Tableau 10 Fréquences de résonance des différents étiquettes sans fil conformément à la valeur de la capacité MOS

Quantité	Valeur	Fréquences (MHz)	
		Résultats de simulation	Valeurs mesurées
Capacité MOS C1 (pF)	33	917	901
	22	923	916
	27	913	908

Conclusion

Le présent travail, décrit l'utilisation de l'étiquette RFID fonctionnent dans les fréquences UHF (902-928MHz) pour la détection de l'hydrogène. L'utilisation des capteurs passifs sans (sans unité de traitement ou dispositif actif) offre la possibilité d'effectuer des mesures dans des environnements hostiles comme l'hydrogène. Les étiquettes RFID utilisés dans ce contexte, offre une grande possibilité d'intégration. Le capteur MOS capacitif utilisé pour la détection du l'hydrogène, qui utilise le palladium comme couche sensible à l'hydrogène à cause de la grande solubilité du gaz sur la surface du matériau par rapport aux autres métaux.

On se basant sur la variation de l'aire de la couche sensible, la fréquence de résonance de l'étiquette (antenne plus capteur) se décale en fonction de la variation de cette aire. De cette manière on peut adresser plusieurs étiquettes qui fonctionnent à des fréquences diverses, ce qui donne naissance à un réseau sans fil constitué de plusieurs puces. Pour transférer ces données, les étiquettes n'utilisent aucune modulation, car chaque étiquette transmet ces données à une fréquence différente des autres étiquettes.

L'étape prochaine dans ce travail, porte sur la miniaturisation de l'antenne utilisée dans les capteurs sans fil dans le but d'avoir un facteur d'encombrement plus grand de ces étiquettes dans des endroits difficiles d'accès. L'intégration dans un contexte métallique est l'une des contraintes à contourner.

Les résultats présenté dans ce mémoire ont fait l'objet d'un article publié dans la conférence CCECE organisé du 29 April au 2 May 2012 à Montréal (25th Annual

Canadian Conference on Electrical and Electrical Computer Engineering CCECE 2012).

L'article à gagner le prix **The Best Student Paper Award IEEE Canada**, voir l'annexe C.

Bibliographie (ou Références)¹

- [1] S. S. C. S. L. L. I. Lundström, «A hydrogen-sensitive MOS field-effect transistor,» vol. 26, n° 155–57, 1975.
 - [2] X. D. Qu, MOS CAPACITOR SENSOR ARRAY FOR HYDROGEN GAS MEASUREMENT, 2005.
 - [3] K. Finkenzeller, RFID handbook: radio-frequency identification fundamentals and applications, John Wiley, 2000.
 - [4] J.-P. HAUET, «L'IDENTIFICATION PAR RADIOFRÉQUENCE (RFID)-TECHNIQUES ET PERSPECTIVES,» n° 110, novembre 2006.
 - [5] M. H. Adam Bouřa, «Potentiality of the Inductive Powering for Measurement in the Enclosed Systems,» ©2010.
 - [6] [En ligne]. Available: <http://rfid-handbook.de/about-rfid.html?showall=&start=1>.
 - [7] S. A. H. F. W. L. C. M. Z. a. S. M. Z. Fei, «Relay Effect of Wireless Power Transfer Using Strongly Coupled Magnetic Resonances,» vol. 47, 2011.
 - [8] M. M. a. J. C. Peter J. Hawrylak, The Internet of Things, Auerbach Publications, 2008.
 - [9] D. M. Dobkin, «The RF in RFID: UHF RFID in Practice».
-

- [10] a. Y. D. Cunyue Liu, «Resonant Coupling of a Passive Inductance-Capacitance-Resistor Loop in Coil-Based Sensing Systems,» 2011.
- [11] L. L. & O. B. Lars Rindorf, «RESONANTLY COUPLED ANTENNAS FOR PASSIVE SENSORS,» 2008.
- [12] [En ligne]. Available: <http://www.kestronics.com/>.
- [13] H. W. G. W. Xiafei Wang, «Distributed High-Frequency RFID Antennas for Smart Storage Racks,» 2010.
- [14] [En ligne]. Available: <http://rfid.averydennison.com/product-categories/>.
- [15] S. M. I. a. O. B. A. S. M. I. Alper Bereketli, «Communication Coverage in Wireless Passive Sensor Networks,» *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, vol. 13, n° %12, FEBRUARY 2009.
- [16] C. A. Balanis, ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN, Hoboken, New Jersey: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2005.
- [17] L. J. W. H. L. H. Gao Hongmin, «Design and Improvement of Printed IFA for Bluetooth System,» 2011.
- [18] S. M. I. a. T. I. L. F. I. Yuandan Dong, «Miniaturized Substrate Integrated Waveguide Slot Antennas Based on Negative Order Resonance,» vol. 58, n° %112, DECEMBER 2010.
- [19] M. A. R. M. Z. A. A. A. a. A. A. M. H. Jamaluddin, «Microstrip Dipole Antenna Analysis with Different Width and Length at 2.4,» 2005.
- [20] Z. B. L. Y. J. C. R. N. X. a. C. F. Z. Dan Sun, « DESIGN OF A WIDE-BAND CONFORMAL PHASED ARRAY ANTENNA WITH APERTURE-COUPLED ANTENNA».

- [21] R. H. B. G. J. Meyer, «A Testbed for Precision Impedance Measurements of Planar Symmetrical RFID Antennas,» 28-30 September 2010.
- [22] B. J. B. M. S. a. S. K. M. Z. Atashbar, «3-D Finite-Element Simulation Model of SAW Palladium Thin Film Hydrogen Sensor,» *IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, p. 550, 2004.
- [23] A. P. E. V. A. D'Amico, «Surface acoustic wave hydrogen sensor,» *Sensors and Actuators*, vol. 3, pp. 31-39, 1982/1983.
- [24] L. B.-B. G. B. U. B. T. Hüberta, «Hydrogen sensors – A review,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, p. 338, 2011.
- [25] G. Y. K. V. N. Z. S. S. F. Yurii S. Krasnov, «OPTICAL HYDROGEN SENSOR BASED ON TUNGSTEN OXIDE FILM,» 2008.
- [26] M. S. J. P. a. M. B. Martin Adamek, « The Increase of Electrode Surface of Thick–Film Electrochemical Sensors by Unconventional Method,» 2011.
- [27] K. Y. C. A. F. M. N. Mun Teng Soo, «Advances of SiC-based MOS capacitor hydrogen sensors for harsh environment applications,» 23 October 2010.
- [28] R. D. S. S. D. Dwivedi, «Sensing properties of palladium-gate MOS (Pd-MOS) hydrogen sensor-based on plasma grown silicon dioxide,» *Elsevier Science*, 1998.
- [29] M. R. J. Maget, «Influence of the MOS varactor gate doping on the performance of a 2.7GHz -4GHz LC-VCO in standard digital 0.12μm CMOS technology,» Vols. %1 sur %2 D-85577, D-81730, 2002.
- [30] A. C. Diebold, *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology*, CRC Press, 2001.
- [31] R. K. M. T. Judith Maget, «A Physical Model of a CMOS Varactor with High Capacitance Tuning Range and its Application to Simulate a Voltage Controlled Oscillator,» Vols. %1 sur %2 *Solid-State Electronics* 46, February

2002.

- [32] H.Mathieu, Physique des semiconducteurs et des composants électriques, Paris, 2001.
- [33] I. L. C. S. H. H. M.S. Shivaraman, «Hudrogen sensitivity of palladium-thin-oxide-silicon Schottky barriers,» *Electron.Lett*, pp. 484-485, 1976.
- [34] G. M. M.A Formoso, «The effect of hydrogen and carbon monoxide on the interface state density in MOS gas sensor with the ultra thin palladium gates,» *Sensors and Actuators* , pp. 11-12, 1990.
- [35] F. A. Lewis, The Palladium Hydrogen System, London and New York : Academic Press, 1967.
- [36] D. S. I. Lundstrom M. Armgarth, «Palladium and platinum gate metaloxide-semiconductor capacitors in hydrogen and oxygen mixtures,» *Appl.Phys. Lett*, 1982.
- [37] N. Yamazoe, J. Fuchigami, M. Kishikawa et T. Seiyama, «Interactions of tin oxide surface with O₂, H₂O and H₂,» *Surf. Sci*, vol. 86, p. 335–344., 1979.
- [38] N. Barsan et U. Weimar, «Understanding the fundamental principles of metal oxide based gas sensors; the example of CO sensing with SnO₂ sensors in the presence of humidity,» *J. Phys. Cond Matt*, n° 15, p. 1813, 2003.
- [39] L. M. C. A. A. a. R. B. George F. Fine, «Metal Oxide Semi-Conductor Gas Sensors in Environmental,» 1 June 2010.
- [40] R. D. S. S. D. Dwiedi, «The effect of hydrogen induced interface traps on Titanium dioxide based palladium gate MOS capacitor,» *Microelectronics Journal*, vol. 29, pp. 445-450, 1998.
- [41] H. S. M. STRUCTURES, «I Lundstrbm, MS Shivaraman and C Svensson,» p. 631.

- [42] J. B. G. B. P. M. P. C. T. H. b. U. B. L. Boon-Brett, «Identifying performance gaps in hydrogen safety sensor technology for automotive and stationary applications,» n° 135, 2009.
- [43] I. I. I. O. VIM-6.13 BIPM, «International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM),» 1993.
- [44] D. Paret, Applications en identification radiofréquence et cartes à puce sans contact : [RFID], Paris: Dunod , c2003.
- [45] e. chemistry, «<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Pd.html>».
- [46] T. P. A. B. LALEVIC, «Pd-MOS Hydrogen and Hydrocarbon Sensor Device,» Vols. 1 sur 2 EDL-2, n° 14, 1981.
- [47] L. C. Godara, Handbook of Antennas in Wireless Communications, CRC Press, 2001.
- [48] Rogers, «ROGERS CORPORATION,» 2010. [En ligne].
- [49] A. S. M. A. C. N. a. I. L. F. Winkvist, «Modified palladium metal-oxide-semiconductor structures with increased ammonia gas sensitivity,» vol. 43, 1983.
- [50] T. COMPANY. [En ligne].
- [51] V. Casey, 'Metal Oxide Semiconductor MOS System, Solid State Physics 2PH4608.
- [52] B. V. Zeghbroeck, Principles of Semiconductor Devices, 2001.
- [53] F. A. Lewis, «The Palladium-Hydrogen System,» *Academic press*, 1982.
- [54] M. S. a. C. S. I Lundstrbm, «HYDROGEN SENSITIVE MOS STRUCTURES».

- [55] H. K. a. K. Sawaya, «Long Range Passive RFID-Tag for Sensor Networks,» 2005 IEEE.
- [56] E. S. a. M. Serpelloni, «Passive and self-powered autonomous,» 2009.
- [57] b. L. C. Godara, Handbook of Antennas in Wireless Communications, CRC Press, 2001.
- [58] Y. K. a. Y.-H. M. Yuri Tikhov, «Compact Low Cost Antenna for Passive RFID Transponder,» 2006.
- [59] J.-H. Y. Min-Sung Kwon, «RFID Tag Range Measurement System Using Isolation Antenna,» n° 137th, © 2007 .
- [60] C. A. Balanis, Antenna Theory Third Edition Design and Analyasis, New Jersey: John Wiley & Son, 2005.
- [61] L. I. Alfred Pols, «New Passive Sensors,» 1993.
- [62] [En ligne]. Available: <http://news.thomasnet.com/news/communication-systems-equipment/rf-microwave-communication-systems-equipment/rf-microwave-antennas/120>.
- [63] [En ligne]. Available: http://www.prsplash.co.uk/releases/3766-uhf_gen2_rfid_satellite_tag.
- [64] R. P. I. F. J. Velez, WiMAX Networks Techno-Economic Vision and Challenges, Springer Science + Business Media, 2010.
- [65] C. C. Naftall (Tuli) Herscovlcl, «Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks Part I: Overview and Antenna Design,» vol. 44, n° 13, 2002.
- [66] T.-Y. C. K. H. L. T. G. D. G. M. Jen-Chieh Wu, «Design of 60-GHz Monopole

Antenna for Switched-Beam Antenna Array,» 2011.

[67] N. C. KARMAKAR, HANDBOOK OF SMART ANTENNAS FOR RFID SYSTEMS, John Wiley & Sons, Inc, 2010.

[68] «<http://www.hindawi.com/journals/asp/2009/128516/>,» [En ligne].

[69] M. M. |. Y. W. |. K. Chang, «Multiple Antenna Technologies,» INHA University.

[70] Y. Y. J. M. Krzysztof Kurek, Investigation of Smart Antennas for LEO Stellite System, 2005.

Annexe A – Équations de la capacité MOS

Annexe A-1 : Calcul de la capacité de bande plate

L'analyse d'un condensateur MOS est semblable à celle d'une unique jonction n+p. Nous résolvons l'équation de Poisson dans la région de p.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-\rho_S(x)}{\varepsilon_S} \quad (\text{A-1})$$

Où ρ_S est la densité de charge, N_a est la densité d'accepteur dans le substrat. La densité de charge totale dans le semi-conducteur est indiquée par :

$$\rho = q(p + N_d^+ - n - N_a^-) \quad (\text{A-2})$$

$$\text{Pour l'épuisement, } \rho_S = -qN_a \quad (\text{A-3})$$

À l'équilibre thermique, les densités de trou et d'électron, p et n, peuvent être exprimées en fonction du potentiel, Φ , et d'un potentiel de référence, Φ_F [51].

$$p = n_i \exp\left(\frac{\phi_F - \phi(x)}{V_t}\right) \quad (\text{A-4})$$

Loin de l'interface de semi-conducteur-oxyde, la densité de charge est nulle et nous définissons le potentiel, Φ , d'être nulle là aussi, de sorte que [31] :

$$N_d^+ - N_a^- = -2n_i \sinh\left(\frac{\phi_F}{V_t}\right) \quad (\text{A-5})$$

L'équation de Poisson prend alors la forme suivante :

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{2qn_i}{\varepsilon_S} \left[\sinh\left(\frac{\phi - \phi_F}{V_t}\right) + \sinh\left(\frac{\phi_F}{V_t}\right) \right] \quad (\text{A-6})$$

$$(\text{A-7})$$

Le champ électrique a le même signe que le potentiel. La relation entre le champ et le potentiel sur la surface à l'équilibre thermique est alors [52]:

$$\varepsilon_{s,eq}(\phi) = 2\text{sign}(\phi_S) \sqrt{\frac{4qn_iV_t}{\varepsilon_S} \left[\cosh\left(\frac{\phi_S - \phi_F}{V_t}\right) + \frac{\phi}{V_t} \sinh\left(\frac{\phi_F}{V_t}\right) - \cosh\left(\frac{\phi_F}{V_t}\right) \right]} \quad (\text{B-9})$$

La tension de grille égale la somme de la tension de bandes-plates (flat-band), de la tension à travers l'oxyde et du potentiel à travers le semi-conducteur [51] :

$$V_G = V_{FB} + \phi_S + V_{OX} \quad (\text{A-8})$$

$$\text{Avec, } V_{OX} = t_{OX} \varepsilon_{s,eq}(\phi_S) \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_{OX}} \quad (\text{A-9})$$

Enfin, nous trouvons :

$$C_{LF} = \frac{1}{\frac{1}{C_{OX}} + \frac{1}{C_{S,LF}}} \quad (\text{A-10})$$

$$\text{Où, } C_{OX} = \frac{\varepsilon_{OX}}{t_{OX}} \text{ et } C_{S,LF} = \varepsilon \frac{d\varepsilon_{s,eq}}{d\phi_S}$$

$$C_{S,LF} = \frac{2qn_i}{\varepsilon_{s,eq}} \left[\sinh\left(\frac{\phi - \phi_F}{V_t}\right) + \sinh\left(\frac{\phi_F}{V_t}\right) \right] \quad (\text{A-11})$$

En intégrant l'équation de Poisson deux fois, donnent.

$$\psi = \psi_S \left[1 - \frac{x}{d_{\max}} \right]^2 \quad (\text{A-12})$$

$$\text{Où, } \psi_S = \frac{qN_A d_{\max}^2}{2\varepsilon_S}$$

(B-15)

Pour l'inversion efficace, le critère est $N_S = N_A$.

$$\text{Où, } \psi_S = 2\psi_B = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (\text{A-13})$$

La largeur de région d'épuisement sature, c.-à-d. atteint un maximum, à l'inversion efficace (de basse fréquence) [51].

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S 2\psi_S}{qN_A}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_S kT \ln \frac{N_A}{n_i}}{q^2 N_A}} \quad (\text{A-14})$$

Nous trouvons la charge de l'espace

$$Q_{SC} = -qN_A d_{\max} \cong -\sqrt{2q\varepsilon_S N_A (2\psi_B)} \quad (\text{A-15})$$

$$\text{Elle vient alors, } \frac{C}{C_O} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\varepsilon_O^2 V}{qN_A \varepsilon_S d_O^2}}} \quad (\text{A-16})$$

Pour l'épuisement V_G est positive. L'augmentation de la tension de grille aura comme conséquence un C décroissant. Pour l'accumulation, V_G est négatif et il n'y a aucune couche de déplétion.

$$C = C_O = \frac{\varepsilon_O}{d_O} \quad (\text{A-17})$$

Pour l'inversion, la capacité est au minimum.

$$C_{\min} = \frac{\varepsilon_O}{d_O + \frac{\varepsilon_O}{\varepsilon_S} d_{\max}} \quad (\text{A-18})$$

Dans la technologie CMOS, presque tous les condensateurs emploient l'oxyde de silicium (SiO₂) comme isolateur [8]. La capacité d'un "condensateur d'oxyde" est donnée par :

$$C_{ox} = A \cdot \frac{\varepsilon_{OX}}{T_{ox}} \quad (\text{A-19})$$

Où, $\varepsilon_{OX} = K_{OX} \cdot \varepsilon_0$ (constante diélectrique d'oxyde [SiO₂])

▪ $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$ F/cm (constante diélectrique de l'espace libre)

t_{OX} est l'épaisseur de l'oxyde.

Parfois il est maniable d'employer la capacité par unité de superficie,

$$C'_{OX} = \frac{\varepsilon_{OX}}{T_{ox}}$$

Annexe A-2 : Capacité dans les hautes fréquences

La capacité à haute fréquence d'un condensateur MOS est mesurée en appliquant une petite tension en courant alternatif, en plus de la tension de grille en courant continu. Une expression approchée peut être obtenue en ignorant la variation de charge dans la couche d'inversion produisant l'expression de la capacité, dans des conditions d'épuisement profondes [52]. Cependant depuis la tension de grille est modifiée lentement tout en mesurant la capacité en fonction de la tension, la tension de grille est calculée à partir du potentiel de surface comprenant la charge dans la couche d'inversion sous l'équilibre thermique. La capacité est alors donnée par :

$$C_s = \frac{qn_i}{\varepsilon_{s,dd}} \left[2 \sinh \left(\frac{\phi_F}{V_i} \right) - \exp \left(\left(\frac{\phi_F - \phi_s}{V_i} \right) \right) \right] \quad (\text{A-20})$$

Avec le champ électrique, $\varepsilon_{s,dd}$ obtenu dans des conditions d'épuisement profondes.

C'est la même expression que pour la capacité dans des conditions d'épuisement profond. Cependant, la tension de grille correspondant est différente, à savoir:

$$V_G = V_{FB} + \phi_s + V_{ox}, \text{ avec } V_{ox} = t_{ox} \varepsilon_{s,eq} (\phi_s) \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ox}} \quad (\text{A-21})$$

Où le champ électrique, $\varepsilon_{s,eq}$ est le champ d'équilibre thermique.

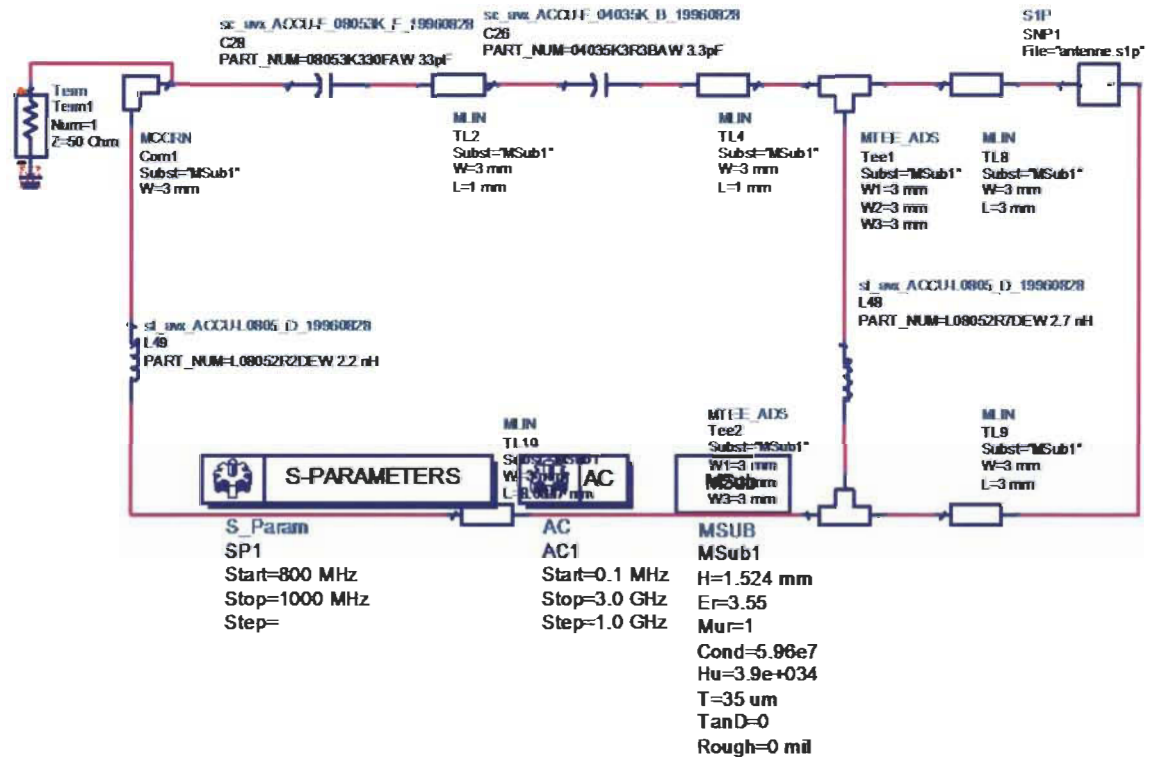
Il la capacité correspondante est également inclus dans Figure 30 la avec la capacité minimale attendue sur la base du rapprochement d'épuisement complet, corrigé de la tension thermique:

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \sqrt{\frac{2(2\phi_F + V_t)}{qN_a \varepsilon_s}} \quad (\text{A-22})$$

Comme illustré à la Figure 30, la capacité à haute fréquence au début de la forte inversion $\phi_s = 2\phi_F$ et au-delà se trouve à être pratiquement constante. En supposant que $\phi_F \gg V_t$, ainsi l'équation (A-20) devient :

$$C_{s,HF} = \sqrt{\frac{qN_a \varepsilon_s}{4\phi_F}}, \text{ Pour } V_G - V_{FB} > 2\phi_F + \frac{\sqrt{4qN_a \varepsilon_s \phi_F}}{C_{ox}} \quad (\text{A-23})$$

Annexe –B. Schéma Électrique du circuit RF



PARAMETER SWEEP

```
ParamSweep
Sweep1
SweepVar="CMOS"
SimInstanceName[1]="SP1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=CMOSmin
Stop=CMOSmax
Step=
```



```
VAR
VAR1
CMOS=100
CMOSmin=13 [f]
CMOSmax=2*CMOSmin
```



```
VAR
VAR2
Long=1.0 [f]
```

PARAMETER SWEEP

```
ParamSweep
Sweep2
SweepVar="Long"
SimInstanceName[1]="SP1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=0.5
Stop=1.0
Step=0.1
```

Annexe –C. WIRELESS PASSIVE HYDROGEN GAS SENSOR

Otmane Bekkaoui, Issam Kerroum, Frédéric Domingue, Adel Omar Dahmane
Laboratoire des Microsystèmes et Télécommunications
Université du Québec à Trois-Rivières
Québec, Canada

Abstract

This paper presents an implementation of a passive wireless hydrogen gas sensor tag operating in ISM band at 900 MHz. The antenna has been designed and fabricated to operate with a MOS hydrogen gas sensor. The preliminary results show a promising integration of MOS hydrogen sensor in wireless systems for future sensors network applications and hydrogen vehicles.

1. INTRODUCTION

Wireless communication systems are widely used in many aspects of our live. For instance, cell phones, internet and Bluetooth became essential parts in everyday activities. Due to the advances in wireless technology applications, wireless gas detection systems start to emerge. Hydrogen sensors integrated in wireless RF tag can be used in many applications especially those concerning hydrogen safety.

MOS detectors have been widely used for measuring and monitoring gas traces in many environmental conditions, as well as in hydrogen detection [1]. In comparison to other detection technologies, MOS gas sensors are considered relatively low cost detectors. Moreover, they offer many advantage tags such as robustness, high sensitivity and fast response time.

In this paper, a passive wireless hydrogen sensor tag is presented. it consists of an antenna, passive components and a MOS sensor. The proposed MOS hydrogen sensor operates in the capacitive mode with a palladium layer for hydrogen selectivity.

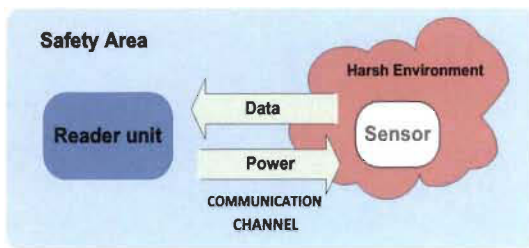


Figure.1. Block diagram of a passive sensor

2. DESIGN OF THE WIRELESS SENSOR

2.1 Proposed Wireless Sensing Tag

For a passive tag, the energy required to operate the transponder is derived from the electromagnetic field propagated by the processing unit data as shown in Fig. 1.

For this reason, the identification data and information collected by the sensor need to be sent between the tag and the reader by means of electromagnetic waves [2].

Since the RF device operates in the ISM band, more specifically in the 900 MHz band, the wireless sensor must present good RF performance to receive the maximum signal sent by the reader and supply power to the tag. In addition, a robust mechanical structure to meet the various environmental conditions is required as well as a low manufacturing cost [3].

The proposed passive wireless tag is composed of two main parts which are an antenna and the sensing circuit. In the proposed design, the sensing circuit is made with a MOS sensor combined with fixed discrete components, as shown in Fig.2. The circuit needs to be optimized to operation with the 50 ohms antenna. Since the MOS sensor doesn't provide the matching condition, it is necessary to introduce external inductor to fulfill this condition.

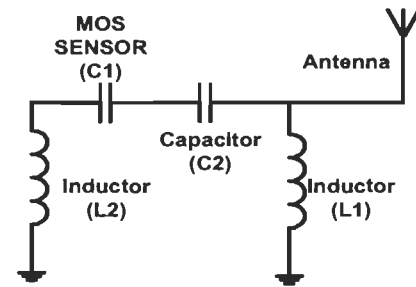


Figure.2. Circuit diagram for passive wireless tag.

1.1 Proposed Hydrogen Sensor

Pd-MOS sensor consists primarily of three main layers, as shown in Fig.3. First, a 50nm thermal oxide is grown on a 500μm of a p-type <100> silicon substrate. Then, oxide on the backside is stripped using BHF. Following that step, a 100nm layer of palladium is evaporated and patterned on the top of the substrate. Finally, a 500nm aluminium layer is sputtered on the back side.

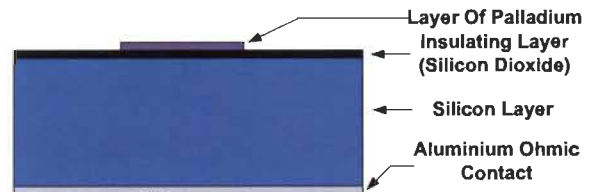


Figure.3. Schematic of Pd-MOS sensor

The hydrogen in the ambient atmosphere causes a significant change in flat-band voltage of the palladium MOS capacitor [4]. This variation is mainly due to the fact that the palladium layer absorbs the hydrogen gas. In fact, the palladium layer dissociated the hydrogen molecule acting as a catalytic material. Then, the hydrogen atoms diffuse through the palladium layer and are adsorbed at the interface between the metal and the insulator (SiO₂). The accumulation of hydrogen atoms polarizes the interface and changes the work function of the palladium metal. The palladium work function decreases from 5.12eV to 4.76eV when the metal absorbs hydrogen gas resulting in a shift of the CV curve [5-6]. Fig. 4 shows the simulated results obtained with MosCap simulator from nanoHUB.org [7].

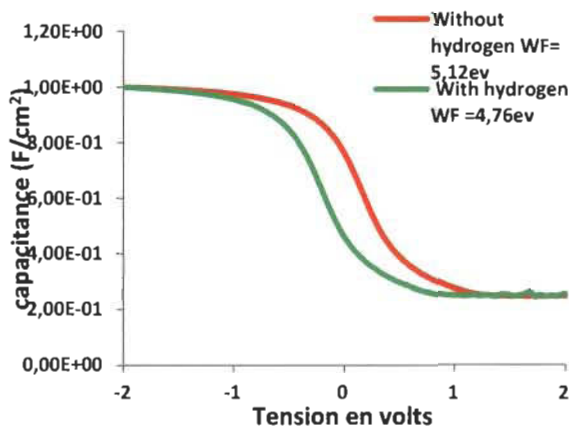


Figure.4. C-V characteristic for the proposed p-type silicon MOS.

1.2 Geometry of Transponder Antenna

An important part in the wireless passive sensor is the antenna. To transfer data collected by the sensor to the processing unit, the antenna must have a good impedance matching. It allows reception of maximum signal by the reader. An omni-directional antenna is an important factor to have a proper behavior in any direction.

The proposed microstrip antenna was designed on a RO4003C dielectric substrate with a 3.55 permittivity and 1.524mm thickness. The antenna design is based on simulations with Momentum software. The geometry of the antenna is shown in Fig.5.

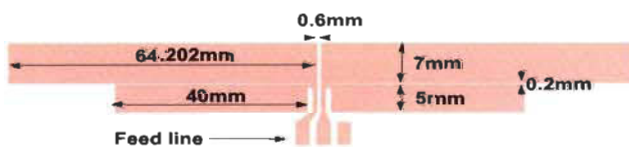


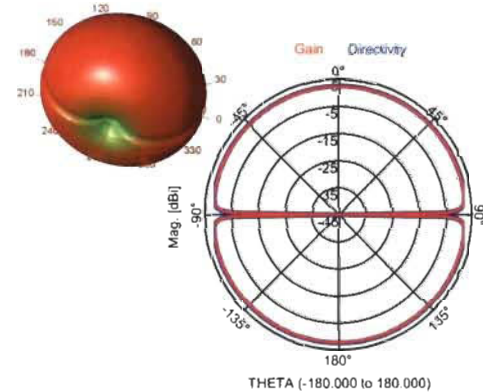
Figure.5. Geometries of the microstrip antenna

1.3 Simulation results

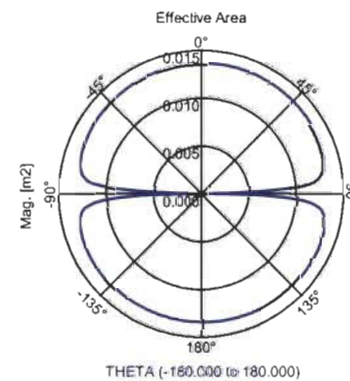
The simulated results of the antenna are summarized in Table 1. The absolute gain of the antenna obtained at 0.925 GHz is 2.08 dB with around 95.80% efficiency. Fig. 6 shows the simulated radiation pattern at 925 MHz with insertion loss equal to -14dB of the proposed antenna.

TABLE I
SUMMARY OF THE PERFORMANCE OF THE PATCH ANTENNA AT 906.9 MHz

Antenna parameters	@903.9MHZ
Gain (dB)	2.08
Directivity [dB]	2.26
Efficiency [%]	95.880



a) Diagram of the gain and directivity



b) Diagram of Effective area

Figure.6. Radiation pattern of the dipole antenna at 920.9 MHz.

1.4 Design of the Wireless Tag

Fig. 2 shows the circuit of the passive wireless tag. This device resonates at frequency 900,1MHz. So, an inductor in series with MOS capacitor is necessary for the devices to resonate at the desired frequency. Operating

values of the RF tag is based on the values of capacitances and inductance. The different values are listed in Table 2.

Quantity	Value
Capacitance C1 (pF)	158
Capacitance C2 (pF)	5.87
Inductance L2 (nH)	14.11
Inductance L1 (nH)	38.04
Frequency f (MHz)	900

The antenna parameters have been used to build the simulation model combining the antenna and the sensing circuit. The return loss of the passive wireless tag is shown in Fig. 7. The resonant frequency is 900.1 MHz with a return loss better than -40dB.

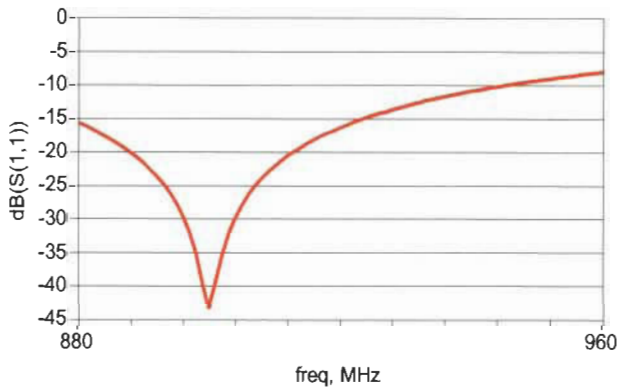


Figure.7. Simulated return loss of the prototype RF etiquette.

In the proposed wireless network, the different tag should resonate at different frequencies so that the reader can identify each transponder. In this proposed design, the only value that has to be changed is that of the MOS sensor. Table III presents the required MOS sensors for three different tag and respective resonance frequencies. Fig. 8 shows the frequencies of these tag. The resonant frequency of each tag slightly varies depending on the hydrogen concentration around these frequencies.

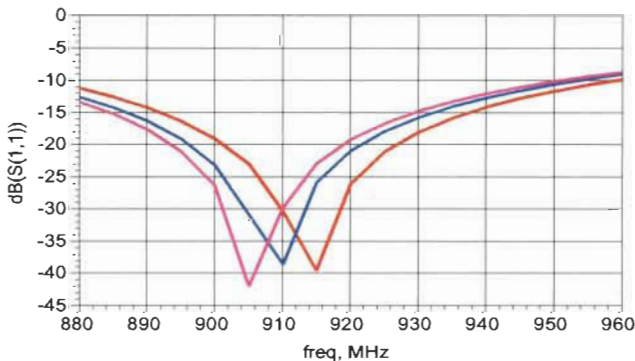


Figure.8. Simulation of the different resonance frequency of the wireless sensor.

Quantity	Value	Freq, (MHz)	Area of capacity
Capacitor C1 (pF)	19.41	915	301 μ m*301 μ m
	29.11	910	243.6 μ m*243.6 μ m
	38.82	905	210.97 μ m*210.97 μ m
Capacitance C2 (pF)	5.87		
Inductance L2 (nH)	14.11		
Inductance L1 (nH)	38.04		

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The fabricated microstrip dipole antenna is shown in Fig. 9. First, the return loss of the antenna has been measured.



Figure.9. Fabricated microstrip dipole antenna.

Fig.10 shows a good agreement between the experimental and simulated results. The resonant frequency of the antenna is 926.5 MHz while the return loss is better than -18dB.

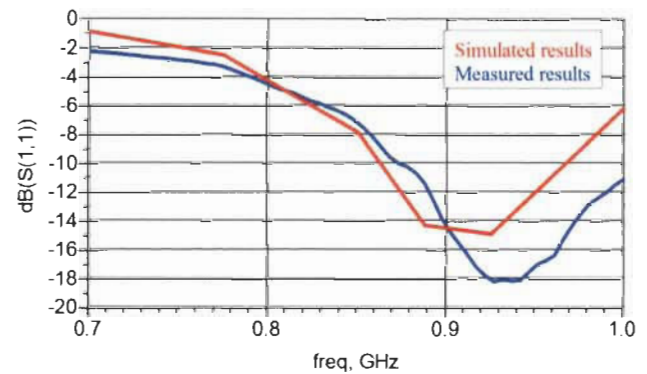


Figure.10. Simulated and experimental results of the antenna.

The experimental results of the antenna have been used to simulate the three wireless tag. Fig. 11 shows the different resonance frequencies of the different wireless

tag using the fabricated antenna. Table IV compares these resonant frequencies with the initially simulated results.

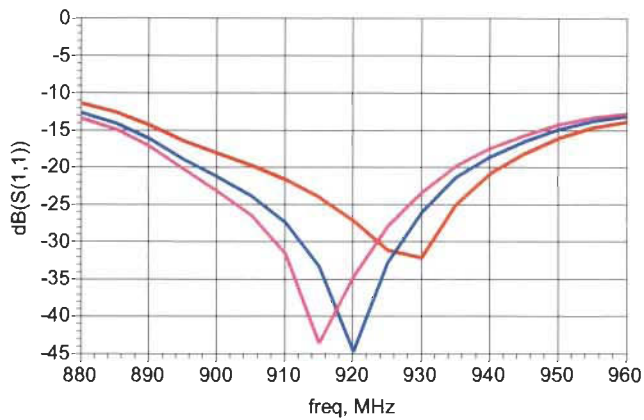


Figure.11. Measured results of the different resonance frequencies of the wireless sensors.

Tableau VI
The different resonant frequency of the wireless tag according to the value of the MOS capacitor

Quantity	Value	Frequencies(MHz)	
		Simulated results	Mesured results
MOS Capacitor C1 (pF)	19.41	915.1	930.1
	29.11	910.1	920.1
	38.82	905.1	915.1

CONCLUSION

A passive wireless tag for MOS hydrogen gas sensor has been proposed. The preliminary results show a promising integration of MOS hydrogen sensor in wireless systems for future sensor network applications and hydrogen vehicles. The antenna has been fabricated and experimental results have been conducted and compared with simulation results of three hydrogen sensors. The antenna return loss is better than 18 dB with a gain of 2.088 dB. In this design, three different resonant frequencies are obtained with different MOS sensors. This circuit shows a promising integration of a hydrogen MOS sensor to create a sensor network for security applications such as gas leaks detection especially in the area of new hydrogen based vehicles.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) of Canada.

Special thanks to Mr Hatem El Mabouly for his contribution to this paper.

REFERENCES

- [1] Xi Dong Ku, "MOS Capacitor Sensor Array For Hydrogen Gas Measurement," B.Sc., Fudan University, 1989.
- [2] Angela I. Barbero, Eirik Rosnes, Guang Yang, and Øyvind Ytrehus, "Constrained Codes for Passive RFID Communication," IEEE Information Theory and Applications Workshop (ITA), La Jolla, 2011, pp. 1-9.
- [3] Emilio Sardini and Mauro Serpelloni, "Passive and Self-Powered Autonomous Sensors for Remote Measurements," Sensors 2009, pp. 943-960.
- [4] F.A. Lewis, "The Palladium Hydrogen System," Academic Press, New York, 1967.
- [5] T. L. Poteat and Bogoljub Lalevic, "Transition Metal-Gate MOS Gaseous Detectors," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. Ed-29, No. 1, January 1982.
- [6] D. Dwivedi, R. Dwivedi, S.K. Srivastava, "Sensing properties of Palladium-gate MOS (Pd-MOS) Hydrogen sensor-based on plasma grown silicon dioxide," Sensors and Actuators B 71 (2000) 161 -168.
- [7] <https://nanohub.org/tools/moscap>